

# 高分解能ロータリーエンコーダの開発

服部 昌 山田和明 桑野俊貴 小舘香椎子

## Development of High-Resolution Optical Rotary-Encoder

M. HATTORI K. YAMADA T. KUMENO K. KODATE

In order to realize the higher resolutional optical encoder, we need to make slits narrower. But, due to the distortion of light wave front by diffraction, it becomes difficult to obtain sufficiently high signal to noise ratio S/N. To avoid this obstacle, we aimed to pass the light through narrow slits by shaping microspots, utilizing diffractive optical elements (DOE) that have been improved in recent years. We have selected FZP (Fresnel Zone Plate) as DOE to form matrix arrayed micro-focusing spots, and assembled it in a compact rotary encoder. This paper describes the characteristics of FZP obtained by using LED light source and the properties of this newly developed rotary encoder with FZPA (Fresnel Zone Plate Array).

**Key Words:** Fresnel Zone Plate(FZP), LED light, micro focusing spot, signal contrast, intensity profile

### 1. はじめに

制御対象の小型・高精度化が進む中で制御状態の検出に用いられるロータリーエンコーダにも小型・高分解能化が求められるようになった。

光学式エンコーダの高分解能化に関しては、屋外など悪条件での使用が想定されるサーボモータ組込み型などの用途では、光源にLEDを用いたのでは高温環境に耐えられず、寿命の問題からLEDを用いることになる。

しかし、LEDを光源として用いた場合、スリットでの回折により、スリットが微細になればなるほど十分な信号コントラストが得られなくなる。

我々は、近年発展の著しいDOE(Diffractive Optical Element: 回折光学素子)を用い、微小スポットを形成して微細スリットに光を通すことによりロータリーエンコーダの高分解能化を試みた。

その結果、50 $\mu\text{m}$ 内外が要求されたインデックススリット~メインスリット間ギャップを200 $\mu\text{m}$ と緩和しつつ、当社従来比2倍のハウジング径38mmで光学分解能4096パルス/回転(スリット幅10 $\mu\text{m}$ )を持つロータリーエンコーダを開発した。

### 2. 光学式ロータリーエンコーダの原理と構造

図1に光学式エンコーダに一般的に用いられているスリットシャッタ方式の構造を示す。

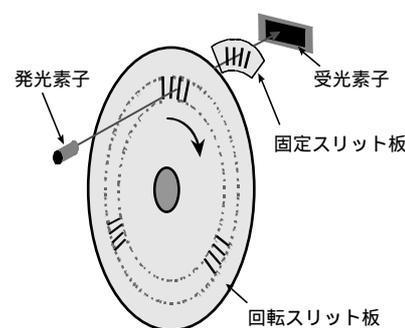


図1 スリットシャッタ方式ロータリーエンコーダの構造

Schematic diagram of optical rotary-encoder

発光素子から出た光は微細なスリットが切つてあるインデックススケールを通過するが、メインスケールに切られたスリットとの相対位置関係により、受光素子に到達したり、遮断されたりする。

受光素子からの出力信号は、図2に示すように理想的には2つのスリットの開口面積の時間的変化に等しいため、三角波となる。しかし、2つのスリットにはギャップがあるため回折影響が出て、山と谷のつぶれた疑似正弦波となる。

この方式でスリット幅を微細化してゆくと山と谷のつぶれがさらに進行し、信号S/Nの低下により、正確なエンコーダパルスを刻むことが難しくなる(図2)。

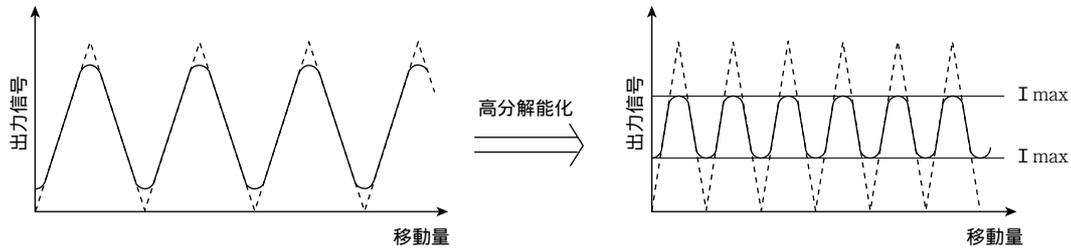


図2 高分解能化による受光素子信号出力の推移

Changes of output signal from photodetector depending on resolution

しかし逆に回折現象を積極的に利用して光束を絞り、メインスリット面でスリット幅以下にすれば高分解能化が可能である。我々はこの考えから微細加工で微小スポットが得られるフレネルゾーンプレートアレイ(FZPA)に着目し、ロータリーエンコーダの高分解能化を進めた。

図3にFZPA方式によるロータリーエンコーダの概念図を示す。

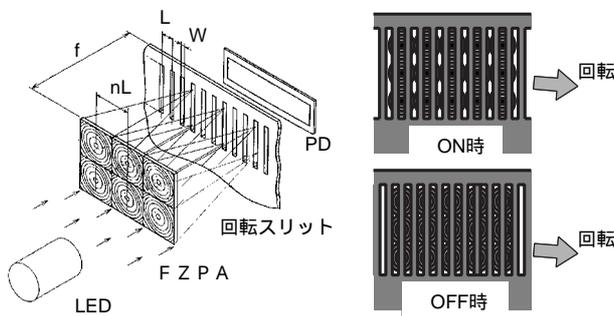


図3 FZPA方式ロータリーエンコーダの概念図<sup>1)</sup>

Schematic diagram of rotary-encoder using FZPA

構造的には光シャッタ方式のインデックススリットをFZPAで置き換え固定スリット板としたものであり、FZPの集光作用により回転スリット上に焦点を結ぶようにギャップを定める。したがって、受光素子側から回転スリットを見ると、図3の右側に示すように回転スリット板の移動に応じて光スポットが一斉にスリット開口部に並んだり、隠れたりすることになる。

### 3. FZPA方式固定スリットの試作

#### 3.1 FZPとは<sup>2)</sup>

従来、レンズとして一般的に用いられてきたのは光の屈折作用を利用したものである。

回折レンズとしては、フレネルレンズが一般的によく知られている。最も簡単な回折レンズはフレネルレンズを同心円状の遮光部と光透過部で構成する振幅型のフレネルゾーンプレートである。しかし、振幅型のレンズは光の利用効率が悪く工業的な利用には位相型にして用いられる。

図4に示すように位相型回折レンズは、平凸レンズを等位相面で切り取り、残った部分を平面上に並べたものである。

原理	タイプ	近似レベル	形状	回折効率
屈折型レンズ	平凸レンズ	-		-
回折型レンズ	ブレード型 ( )			100%
FZP フレネルゾーンプレート	階段近似型	8		95%
	BZP バイナリゾーンプレート	4		81%
		2		41%

図4 位相型回折レンズの構成方法

Structure of phase type diffraction lens

さらに、ブレード形状を階段状に近似したバイナリ形状にしてもキノフォームとほぼ同様の光学効果を有するため成形が容易になり、量産性を備えた超小型の光学素子を安価で製作できる。

今回は、将来成形による量産性を考え、FZPのマルチレベルのバイナリ化を行った。

#### 3.2 FZPの設計条件

FZPのビームスポット径の理論値<sup>3), 4)</sup>は、

$$2_{1/2} = 0.8325 \times 2 \times \frac{f}{F}$$

$$2_{1/e^2} \cong 1.5 \times 2_{1/2}$$

m番目の輪帯の半径は、

$$r_m = \sqrt{m^2 - 2 + 2m f} \cong \sqrt{2m f}$$

で表される<sup>2)</sup>。ただし、

$2_{1/2}$  : 半値スポット径

$2_{1/e^2}$  :  $1/e^2$ スポット径、

$\lambda$  : 光源波長

f : FZPの焦点距離

を示し、以下断らない限りスポット径とは $1/e^2$ スポット径 $2_{1/e^2}$ を示すものとする。

このうち、 $\lambda$  は受光素子の Si フォトダイオードの分光感度から  $\lambda = 860\text{nm}$  付近の AlGaAs 系赤外線 LED を用いることにより固定される。

したがって、パラメータは  $r$  と  $f$  になり、スポットの微小化には FZP を大径化するか、焦点距離を短くすればよいことが解る。しかし、FZP の素子径はスリットピッチに等しいことが理想であり、スリットの微細化とは反する。素子径をスリットピッチの倍数に設定することもできるが、集光スポットの存在しないラインができ、バックグラウンド上昇の原因となるため最小限に押さえる必要がある。さらに、製作上ビームスポットの精度から  $f = 10r$  が望ましく、スリット間ギャップの緩和のためにも  $f$  を大きくとりたいが、これはスポットの微小化を妨げることになる。

この条件でビーム径が最小となるのは、 $D (=2r) = 20, 40, 60, 80 \mu\text{m}$  に対し、それぞれ、100, 200, 300, 400  $\mu\text{m}$  であり、スポット径はいずれも約 7  $\mu\text{m}$  である。

このうち  $D = 20 \mu\text{m}$  では輪帯数がとれないため  $D = 40 \mu\text{m}$ 、 $f = 200 \mu\text{m}$  を採用した。

また、描画可能な最小線幅が 1  $\mu\text{m}$  であることより、近似レベル数は 4 とした。

### 3.3 FZP のアレイ化

FZP をエンコーダに搭載するためには、受光素子に合わせた形でアレイ化を行う。受光素子には既存のロータリーエンコーダ用センサアレイを使用した。このセンサアレイは Si フォトダイオードを採用し、信号相の大きさは  $0.936 \times 0.675 [\text{mm}^2]$  である。この大きさから、FZPA の大きさは決まってしまう、FZPA ~ センサアレイまでの距離を 2 mm に設定すると FZPA の最大面積は  $0.695 \times 0.474 [\text{mm}^2]$  となるが、各部品の組立時の位置精度を考慮し、 $14 \times 8 (0.560 \times 0.320 [\text{mm}^2])$  の配置をとった。

また、FZP は円形の素子であるが、配列時、開口形状を矩形とし集光ビームのパワーを稼いだ。これによりビームパワーは円形の FZP の 1.4 倍にすることができた(図 5)。

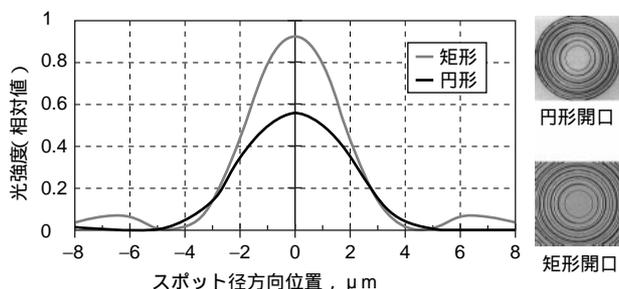


図5 開口形状による集光ビーム光強度の違い

Comparisons of light intensity depending on aperture shape

### 3.4 光源ユニットの設計

FZP は入射波面の相違により設計諸元が異なり、ビームプロファイルも異なってくる。入射波面を球面波とするとビーム径は絞れるが、サイドローブが高くなり、ビームライン以外の部分の光量が増加して望ましくない。このため、入射波面を平面波とする必要があり、光源として用いる LED チップ発光部の小径化と非球面コリメーションレンズによる光源光束の平行化を図った。

光源の発光径とビームスポット径の関係を図 6 に示すが、集光ビーム径は LED チップの発光径の増加とともに増大する。これは、発光径が大きくなるとコリメーションレンズで光束の平行性が補償しきれなくなり、FZP への入射波面のランダムさが増すため、発光径が小さくなると理論スポット径に近づく。

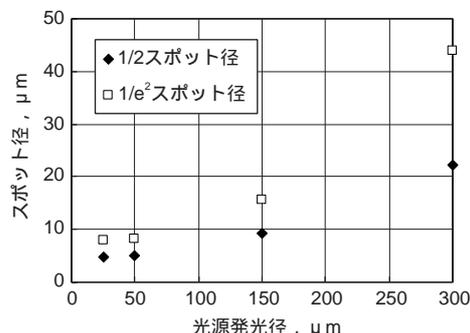


図6 光源発光径と集光スポット径

Light emitting diameter of LED tip versus focusing spot diameter

一方、LED の発光径が小さくなると、電流密度が上がり、定格電流が問題になる。特に、高温環境での使用を考慮すると、常温での使用電流は定格値の 1 / 3 程度に押さえておく必要がある。受光素子の出力信号からは LED の駆動電流は 20mA と設定したが、25 チップでは定格一杯となった。

このため、発光径 50  $\mu\text{m}$  (定格電流 80mA) を採用し、非球面レンズの設計・試作を行った。

図 7 はこの光源光束のビームプロファイルである。半値ビーム径が 4.4mm と大きく、A・B・Z とその共役相に U・V・W とその共役相の 6 相が加わるサーボモータ組込み用途にも十分な有効径を有する。強度ムラも少なく、5 mm 離れた位置でのビーム径変動も 1% と良好な平行性を示している。

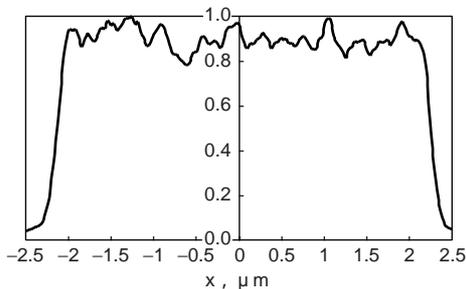


図7 光源光束のプロファイル

Luminous flux profile of LED light source with collimator lens

図8は、試作光源のコヒーレンス長測定結果であるが、わずかではあるがコヒーレンスを有することがわかる。一般のLED光源に関しても同様のコヒーレンス解析を行ったが、コヒーレンスの観測されるものはなかった。

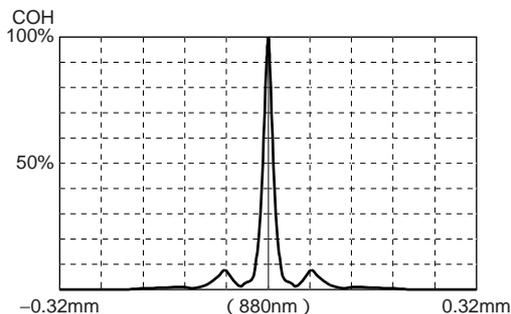


図8 試作光源のコヒーレンス解析結果

Coherence analysis diagram of LED light source with collimeter lens

なお、使用LEDチップのピーク発光波長は  $p = 880\text{nm}$ 、スペクトル半値幅は  $\Delta = 45\text{nm}$  である。

### 3.5 試作FZPAの特性

試作したFZPA板の諸元を表1にまとめる。また、FZPの拡大写真と断面形状を図9に、FZPA板の相配置を図10に示す。

なお、今回FZPはガラス基板上にエッチングプロセスを用いて形成した。

表1 試作FZPA板の設計諸元

Design specifications of prot-type FZPA plate

F Z P 直径 : D	40 $\mu\text{m}$
焦点距離 : f	200 $\mu\text{m}$
近似レベル数 : N	4
開口形状	矩形
設計波長	870nm
理論スポット径	7.0 $\mu\text{m}$
アレイ配列数	縦 8 × 横 14

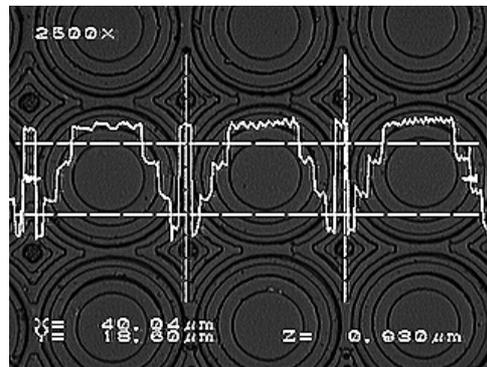


図9 FZPの拡大図と断面形状

Phase arrangement of FZP plate

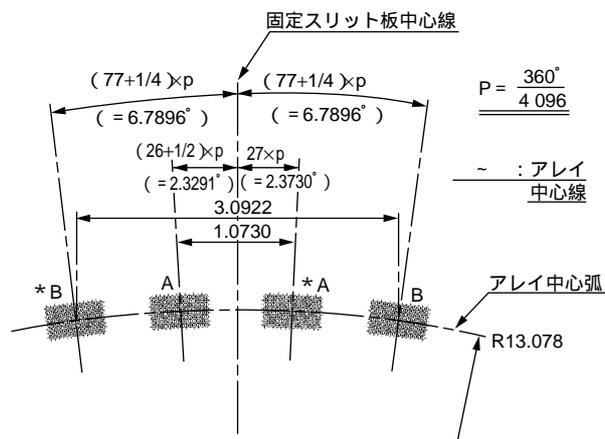


図10 FZPA板の相配置

Surface view and cross section profile of FZP

表2に光源による理論スポット径と実測値、図11に実測したビームプロファイルを示す。

コヒーレント光源ではビームスポット径およびビームプロファイルは理論値とほぼ一致する。

しかしLED光源では、サイドローブが崩れ、バックグランド光として空間全体に広がるようになる。後に述べるが、このバックグランド光が信号S/Nに大きく影響し、エンコーダパルスの精度を左右する。

表2の実測値は、おおよその平均値であり、実際には同一アレイ内では±15%程度のばらつきがある。

焦点距離は、最小スポット距離を特定することが難しく、厳密な数字ではないが、設計値に対しプラス側へ10%強のばらつきとなっている。

焦点距離にばらつきがあるためFZPの焦点深度を測定し、実装時の組付け精度と製作誤差の許容値を推測してみる。

表2 試作F Z P A板のビームスポット径  
Diameters of focusing spot

方向	He-Neレーザー (λ = 633nm)		試作光源 (λ = 880nm)			
	理論値	実測値	理論値	x	y	
2 1/2	3.7	3.9	3.9	4.7	5.1	5.2
2 1/e <sup>2</sup>	5.6	6.3	6.3	7.0	8.4	8.6

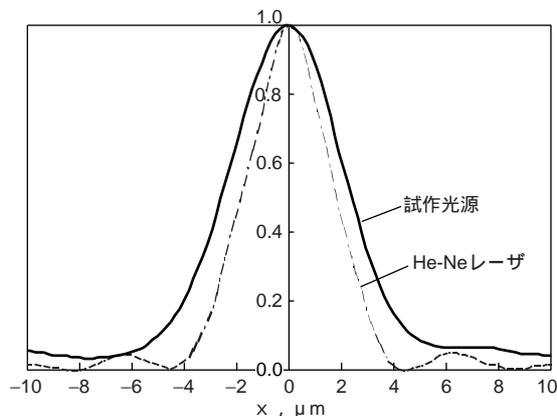


図11 光源によるビームプロファイルの違い

Difference of a beam profile depending on a light source

図12にF Z Pから計測ポイントの距離によるスポット径の変化を示す。スポット径は最小スポット径に対し±20 μmを越えたところから急速に形状を崩し始める。

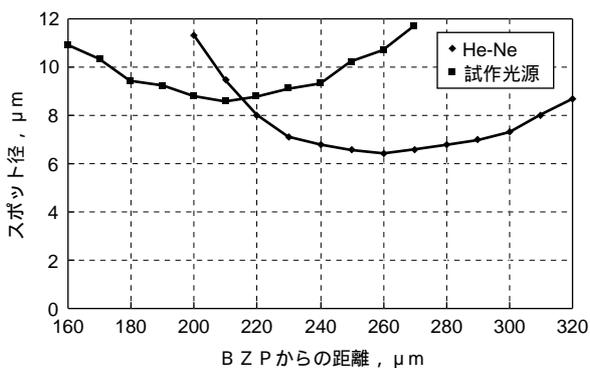


図12 F Z Pの焦点深度  
Focus depth of FZP

したがって、スリット間ギャップ200 μmに対し、誤差は±20 μmが必要になる。このギャップ許容誤差は現行のスリットシャッタ方式にほぼ等しい。

#### 4. エンコーダへの実装

以上のF Z P A固定板と試作した光源を 38のハウジングに組み込み、スリット幅10 μm、4 096

パルス/回転の分解能を持つロータリーエンコーダを製作した。

図13はその外観である。スリット幅が10 μmになってくると、F Z P A固定板と回転スリット板との位置決め精度も厳しく、±5 μm以下の精度が要求される。このため、固定板、回転板に位置決めマークを刻み、C C Dカメラを用いパターンマッチングによる自動組立機を新たに開発し、要求精度を達成した。

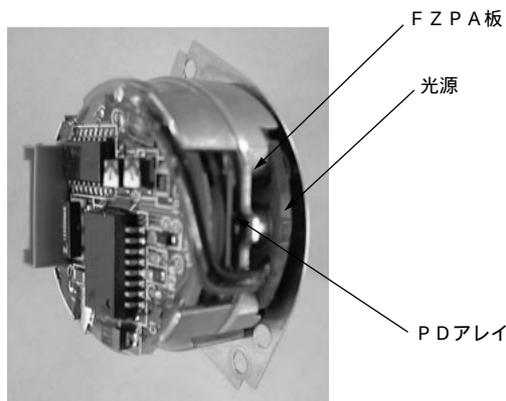


図13 試作ロータリーエンコーダの外観  
Appearance of rotary-encoder

#### (1)回転スリット通過後の波面

図14はエンコーダとして実装した状態で、光源から出た光がF Z P Aで集光された後、回転スリットを通過した状態を受光素子の側から観測したものである。回転スリット板は1.1mmの厚みをもつため、スリット直後の波面を直接観察することはできず、F Z Pの焦点面でスポットを観測したものであり広がっている。スリットがoffの状態では、スリット遮光部は完全にダークに落ちているが、開口部では漏れ光があり、これが信号コントラストを低下させる原因となっている。

#### (2)エンコーダの電気信号

図15に試作ロータリーエンコーダの出力信号を示す。

正弦波状の信号はフォトダイオードからの出力信号であり、下側の矩形パルスはコンパレータを通じたエンコーダからの出力パルスである。

アナログ信号はグラウンドレベルから浮いているが、これは(1)で見たようにスリットがoff状態でも開口部からの漏れ光があるためである。

図2で示したように、アナログ信号の最低値を I min、最大値を I maxとし信号コントラストを

$$C = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$$

とすると、A相、\*A相の信号コントラストは C A = 0.37、C \*A = 0.33となる。

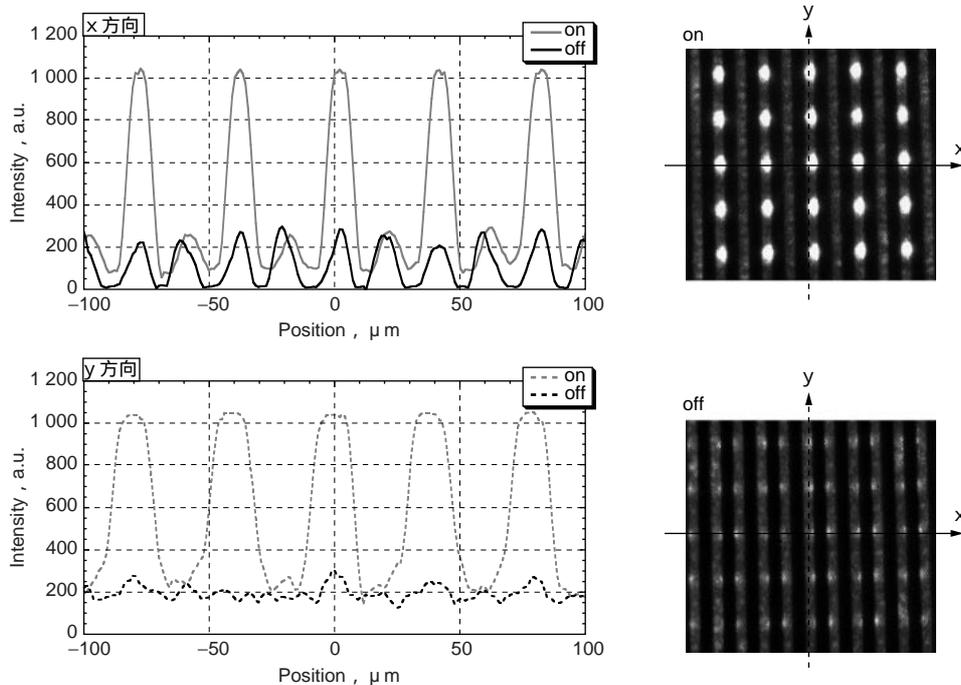


図14 回転スリット通過後の光強度分布

Light intensity distribution observed from back to the rotate-slit plate

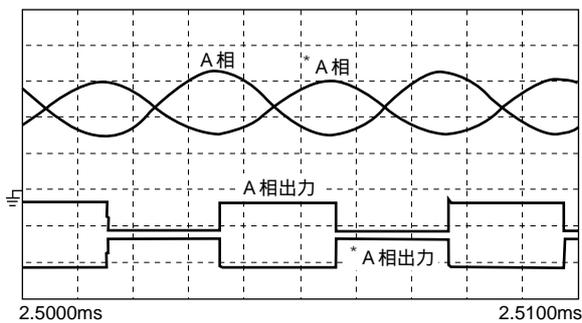


図15 エンコーダの出力信号

Output signals of an encoder

本機では、信号量に若干の差はあるが、受光素子からの出力信号は疑似正弦波を示し、A、\*A相もほぼ正確に逆位相となっている。このためエンコーダパルス出力も正確に50：50を刻んでいる。

一般的に、光源の出射光束内の強度ムラは各相の信号量に効き、光束の平行性に問題あれば位相関係が崩る。その意味で、この信号出力は光源光束の平行性が高く、強度ムラが少ないことを示している。

(3) ビームプロファイルと出力信号の関係

エンコーダ信号の良否はアナログ信号のコントラストに左右されるが、その元は集光ビームのプロファイルに帰着できる。

信号コントラストの低下は、バックグラウンド光が増え、その分ビームのピーク強度も低くなり、信号振幅の減少は倍加されることを意味する。そ

うると、コンパレータの動作がクリティカルになり出力パルスが不安定になる。また、共役相間で信号レベル差や位相ずれがあるとパルスデューティが50：50からはずれてくる。つまり、共役相同士で信号コントラストが大きく異なると、エンコーダ出力パルスが乱れてくる。

図16はビーム形状をガウス型として、 $1/e^2$ ビーム径をパラメータにバックグラウンド量と信号コントラストの関係を計算したものである。

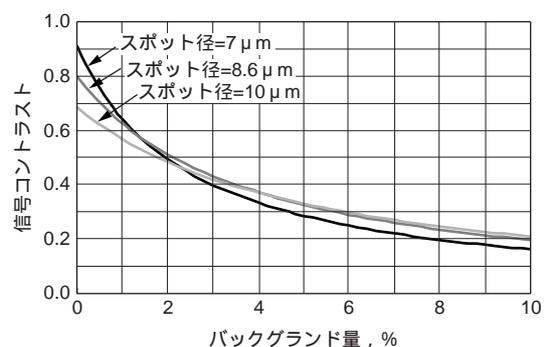


図16 バックグラウンド量と信号コントラスト

Background intensity in focusing profile versus signal contrast from photo detector

ここからは、ビーム径が小さいとバックグラウンドがわずかでも高くなると信号コントラストが大きく低下することが解る。

信号コントラストだけを見ると、スポット径と信号コントラストの逆転が見られ、スポット径を絞る必要がないように思える。しかし、現実には、

スポット径が大きくなるとバックグラウンドも大きくなり、強度ピークも落ちてくる。

図17には、ビームスポット径とバックグラウンドの関係を示す。

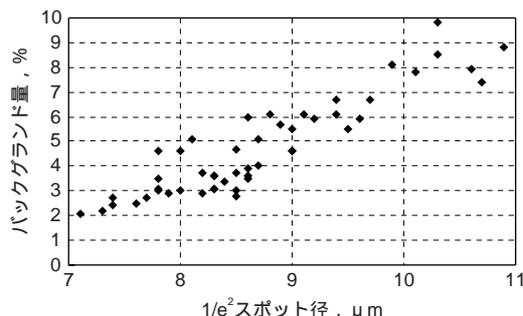


図17 スポット径とバックグラウンド量  
Spot diameter versus background intensity

集光スポット径とバックグラウンドには明らかな相関があり、表2の平均的なビーム径8.5 μmでは、バックグラウンドは4%程度であり、図17からC = 0.37程度になる。

スポット径 = スリット幅 (= 10 μm)では、バックグラウンド約8%、C = 0.2となり、正確なエンコーダ信号は期待できない。

ビーム径が大きくなり、バックグラウンドが上昇する主な原因は、LEDチップとレンズの光軸ずれとデフォーカスであると考えている。今後は、光源ユニットの組立精度を定量的に検討してゆく必要がある。

## 5. おわりに

FZPを用い、従来50 μm程度とギャップ管理の厳しかったスリット間距離を200 μmに広げながら、スリット幅10 μmに対応できるロータリーエンコーダを開発した。

今回は38mmのハウジングを用い14 096パルス/回転のロータリーエンコーダを製作したが、さらに小型の15mmハウジングでも2 048パルス/回転が可能である。

FZP方式によるこれ以上の高分解能化は、FZPへの入射波面をいかに平面波に近づけることができるかということと、実装あるいは製作可能な範囲でビーム設計が成り立つかどうかということに集約される。

今回、前者には発光部の小径化と非球面レンズにより対応を行い、スリット幅10 μmの試作品では良好な信号を得た。しかし、さらに倍の分解能を求めるとFZPの製作面、実装時のスリット間ギャップが厳しくなり、実用面での課題が多く残っている。

むしろ、さらに高分解能化を求める場合、FZPのような集光型素子ではなく、インデックス側とメイン側のピッチが一致する波面再生型素子を用いる方が光の利用効率、相間位相の精度の面から有利であると思われる。

本開発では光源をキーデバイスと考え、光束の改良にも注力した。その結果、LEDから僅かながらもコヒーレンスが発現することを確認した。今後は、このコヒーレンス領域を拡張し、この領域内でDOEを用いれば、その多様な性能を十分に引き出すことができ、より一層の高分解能化への可能性が拓けると考えられる。

## 参考文献

- 1) 折原有子, 清水賀代, 小館香椎子, 山田和明: 「光学式ロータリーエンコーダの高分解能化」平成13年度春期応用物理学関係連合講演会予稿集No. 3(2001)995.
- 2) 応用物理学会日本光学会光設計研究グループ: 「回折光学素子入門」, オプトロニクス社(1997)
- 3) K. Kodate, T. Kamiya, Y. Okada, and H. Takenaka: "Focusing Characteristics of High-Efficiency Fresnel Zone Plate Fabrication by Deep Ultra-violet Lithography," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 25, No. 2, (1986)223
- 4) Y. Okada, K. Kodate, H. Kamiyama, and T. Kamiya, : "Fiber-Optics Pulse Delay Using Composite Zone Plates for Very Fast Optoelectronics," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 27, no. 8, (1988) 1440.

## 筆者



服部 昌\*  
M. HATTORI



山田和明\*  
K. YAMADA



桑野俊貴\*  
T. KUMENO

小館香椎子\*\*  
K. KODATE

\* 総合技術研究所 システム技術研究所  
FAシステム研究部

\*\* 日本女子大学 理学部数物科学科教授 工学博士