

ロータリエンコーダ用高精度LED光源の開発とその応用

Development of High Performance LED Light Source Unit, and Its Applications

山田和明 K. YAMADA 服部 昌 M. HATTORI 梁川 敏 S. YANAGAWA

This article presents the development of LED light source unit for rotary encoder and applications using this unit. Using developed light source, optical characteristics of rotary encoders can be improved exceedingly. In addition to optical improvement, temperature characteristics and durability for humidity have been improved too. High-performance optical unit brings high-resolution, downsizing, adjust-free, reliability, and other advantages to the encoders without increasing in costs.

Key Words: rotary encoder, LED, interference, diffraction, luminous flux

1. はじめに

我々は、以前F Z P(Fresnel Zone Plate)を用いて光ビームを絞ることによりロータリエンコーダの高分解能化を試みた¹⁾。

その時、実装面、光学素子の製作面から集光型の光学素子よりもインデックススケールとメインスケールのピッチが一致する波面再生型の光学素子を用いた方が光の利用効率、相間位相の精度の面からも有利であるという知見を得た。

そこで今回は、光源の波長とスリットの周期で決まる距離にスリット像が再現される現象を用いて、ロータリエンコーダの高分解能化を狙うと共に、低分解能品ではスリット間ギャップ管理の緩和によりフィルムスリットの使用を可能にするなど、広レンジに適用できる光源を開発し、広範囲なエンコーダへの適用を行った。

2. 光学設計

従来、スリットシャッタ方式ではインデックススケールとメインスケールのギャップは狭いほど良いとされてきたが、回折光による干渉を積極的に利用する方式においてはスリット間ギャップは、インデックススケールの像が生じる

$$Z_n = n \cdot \frac{p^2}{\lambda} \quad (1)$$

(n : 正の整数, p : スリットピッチ, λ : 光源波長) で表される距離に設定する^{2), 3)}。

回折像が生じるためには、スリットへの入射光が平面波であることが条件になる。そのためにはレンズから出射する光束は平行なだけでなく位相面の考慮が必要となり、樹脂成形による非球面レンズを新たに開発した。

レンズの材質は高温・高湿環境での信頼性と光学特性に優れるシクロオレフィン系のZEONEXを採用した。一般的によく用いられるPMMA(メタクリル樹脂), PC(ポリカーボネート)との代表的な特性の差を表1に示す。

表1 成型用樹脂光学材料の特性比較⁴⁾

Comparison of materials for optical use

特性	PMMA	P C	ZEONEX
透過率, %	92	87~90	92
屈折率	1.492	1.587	1.525
複屈折率	10~20	40~80	<20
熱変形温度,	100	138	123
ガラス転移点,	105	140	138
飽和吸水率, %	2.0	0.4	<0.01

回折の積極的な利用のため、出射光束の高輝度化、有効照射径内での光量の平滑化を図り、レンズの波面収差には特に注意を払い、R M S波面収差は最悪でもR M S 0.2 を目標とした。

図1, は波面計測結果である。成型時のショット誤差を評価するため200~10 000個を製作し、各ショット毎に抜き取り検査を行いR M S波面収差の評価を行った。

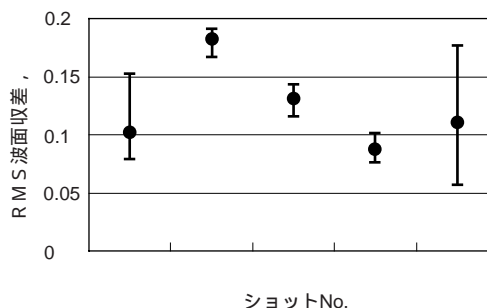


図1 波面収差測定結果

Measurement result of wave aberration

3. 光源ユニットの試作

3.1 開発目標

スリット板間距離の拡大や精度緩和による生産性向上，高分解能スリット板のフィルム化，および回折素子に利用可能，などの効果を得るためには，既製光源ユニットの光学特性では実現不可能であることから，表2に示すように光束の高度な平行性と均一な強度分布を有す高性能光源ユニットの開発に取り組んだ。

表2 開発光源ユニットの目標仕様
Target specification of LED assembly to develop

		従来品		開発目標
		(1)	(2)	
適用	光学分解能	512パルス	2048パルス	2048パルス
	スリット板材質	フィルム	ガラス	フィルム
LED単体性能	使用LEDアセンブリ	A社製	B社製	開発LED
	有効照射エリア	6mm	4mm	4.5mm以上 (必要十分)
	光拡がり角 (光束の平行度)	+2.4deg	+3.5deg	±0.5deg以内
	光強度分布むら (照射エリア内)	20%p-p	50%p-p	10%p-p以下
	コスト	/	/	同程度
効果	スリット板間距離の拡大，精度緩和 (生産性向上，フィルム化)	0.3±0.1mm	0.06±0.02mm	0.2mm以上 (2048パルス)

3.2 LEDチップの選定

光学式センサの光源用として一般的に用いられている赤色～赤外光のLEDチップについて，波長，発光部サイズ，発光部形状，構造，などで分類し，本開発の目的に適合する特性に関する傾向を予備的に試験するなどして採用チップ選定の条件を検討した(表3)。

発光波長は，三元系の赤外LED (AlGaAs)と四元系の赤色LED (InAlGaP)の比較を行った。赤色LEDはスペクトル半値幅が赤外の約半分と狭いため可干渉性などの光学特性的には有利であるが，受光素子の分光感度とのマッチング，寿命・耐環境性，使用実績などに問題があり，最終的には波長860nmに発光ピークをもつAlGaAs赤外チップを採用した。

発光部径は小さいほど光束の平行化などに有利であるが，回折を積極的に利用する用途以外では0.05mmと0.15mmの優劣差が小さくなるため，光出力・寿命で有利な発光部0.15mmのチップの方が好ましいと考えられた。

表3 LEDチップの選定条件

Conditions for selecting of LED chips

分類	比較	光学性能	高出力	長寿命	耐環境	コスト
波長	長 (赤外)	(可干渉減)	-			
	短 (赤色)		-	(活性化エネルギー大)	(AI腐食)	~ (流通量)
発光部サイズ	大	× (平行化劣，可干渉減)			-	
	小		~ (要電流狭窄)	(電流密度大)	-	~ (流通量)
発光部形状	矩形	× (不均一)	-	-	-	-
	円形		-	-	-	-
構造	通常 (センタ電極)	× (ワイヤの影)			-	
	点発光 (電流狭窄)		~	(電流密度大)	-	~ (流通量)

また発光部の形状・構造に関しては，従来品のように矩形発光部の中央に設けられた電極にワイヤボンディングされているものではワイヤの影が光強度分布むらとして現れ，光学性能を要求される用途には不向きであり，円形で電流狭窄を用いた点発光タイプのLEDチップを用いた(図2)。

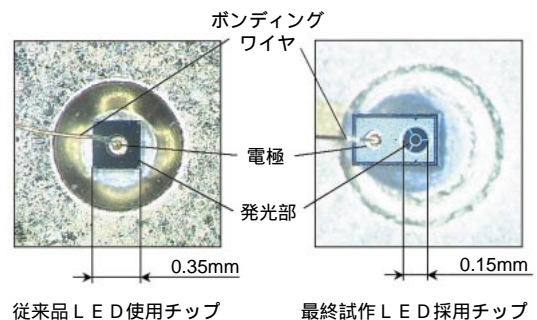


図2 LEDチップの外観
Detail of LED chips

3.3 光源ユニット単体での光学評価

選定したLEDチップをステムにマウントし，新設計の樹脂成型キャップレンズを組み付けた試作光源ユニット(図3)について，まず単体での光学特性を評価した。



図3 試作光源ユニット
LED illuminant unit prototype

3.3.1 光束の平行性

光束の平行性は、図4に示す「光拡がり角()」を定義し評価した。その結果、従来品光源ユニットが拡がり角+2.4degであったのに対し、最終試作光源ユニットでは - 0.3 ~ 0 degと光束の高い平行性が得られた。

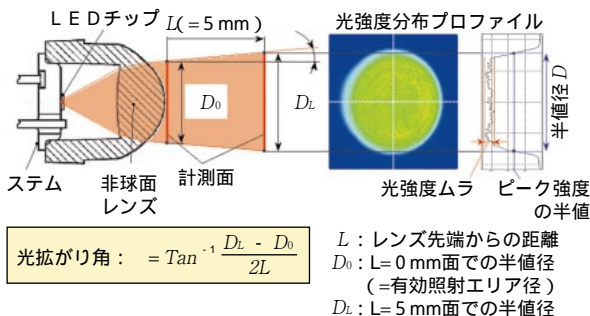


図4 評価した光学特性の定義

Definition of evaluated optical performance

3.3.2 有効照射径と光強度分布の均一性

有効照射エリアと均一性については光強度分布プロファイル計測により評価した結果を図5に示す。

最終試作光源ユニットでは、有効照射エリア径 4.50 ~ 4.60mm, 光強度むら10%p-p以下となり目標値を達成することができた。

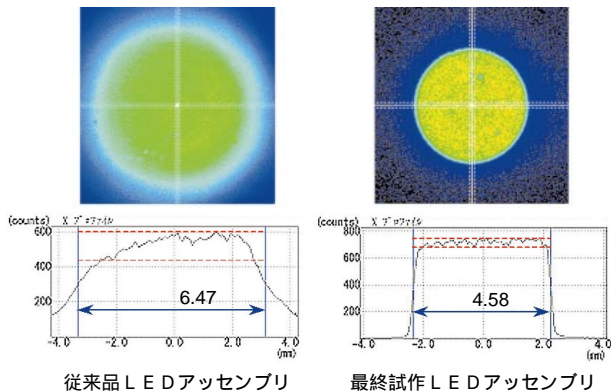


図5 光強度分布プロファイル

Profile of luminous intensity

3.3.3 レンズ組付高さばらつきの影響

樹脂成型キャップレンズをステムに組み付けるとき、その組付高さをどの程度の精度で管理すれば良いかを調べた。その結果、組付高さとの光拡がり角には変化率 - 9.13deg/mmの関係があり、目標の ±0.5degに収まる光拡がり角を得るためには ±0.055mmの組付高さ精度が必要であることが分かった(図6)。

試作サンプルした(n = 30)の組付高さばらつきは、3で約0.014mmであったことから、±3では ±0.12degのばらつきに収まると判断できる。

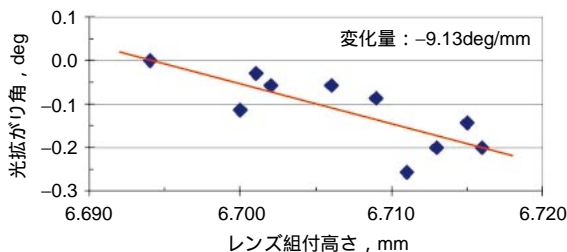


図6 レンズ組付高さばらつきの影響

Influence of uneven assembled-height of the lenses

3.3.4 光源ユニットの光学性能

図7にスリットの像とそのプロファイルの例を示す。

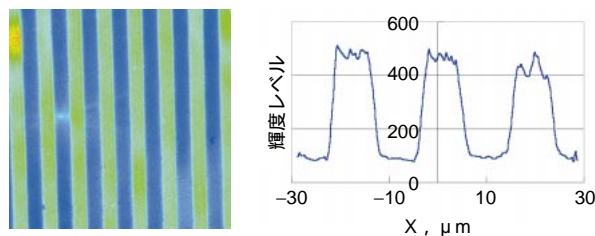


図7 スリット像とそのプロファイル

Slit image and profile of luminous intensity

図8はスリット像の光学コントラストがスリットからの距離により変化する様子を示したものである。ただし、光学コントラストは像のプロファイルにおける輝度のピーク値I_{max}とボトム値I_{min}を用いて

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

で表されるものとする。

従来光源では距離に対し光学コントラストは単調に減少する。これに対し試作光源では、40 μmスリットでは光学コントラストは単調減少するが、20 μmスリットでは250 μmから上昇し、回折像を結ぶ450 μm近辺でピークを持っている。

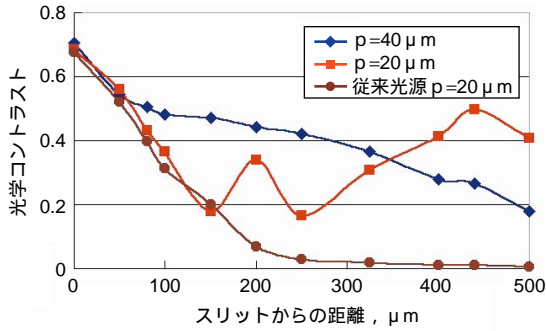


図8 スリット像の光学コントラスト
Optical contrasts of slits image

なお、200 μm で小さなピークがあるが、ここでは元のスリットに対し2 逡倍像が生じている(図9)。これも回折効果によるものである。

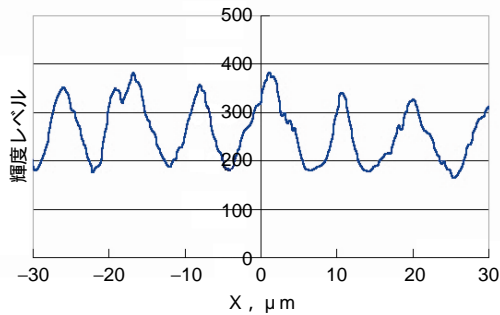


図9 回折による2 逡倍像

2x interpolation image caused by diffraction

回折効果はスリットを細かくしていくと顕著になる。図10は試作光源を用いて式(1)で計算される距離でのスリット像の光学コントラストを示したものである。この図より、試作光源ではスリットが微細化しても十分な光学性能が得られることがわかる。

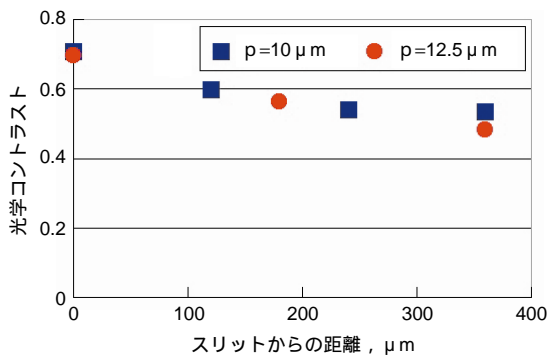


図10 高分解能スリットに対する光学性能

Relation between optical contrast and distance to slit

スリット間ギャップは式(1)から明らかなように、スリットピッチ p が大きくなると p^2 に比例して大きくなり実用的ではなくなる。

回折像の利用域をスリットからの距離が300 μm 以下とすれば、 $p = 16 \mu\text{m}$ が回折を積極的に利用するかどうかの分岐点になり、これ以上のスリットピッチであれば、ギャップを詰める従来方式の方が有利となる。

4. ロータリエンコーダへの実装評価

試作した光源ユニットを、従来品に実装されている光源ユニットと入れ替える形で組み込み、その電気性能を比較評価した。

4.1 スリット板間距離の影響

受光素子から出力されるアナログ出力の電圧波形(図11)をオシロスコープで計測し、振幅の大きさ $a - b$ とバックグラウンド b の比を $(a - b) / b$ を S / N 比とし、スリット板間の距離と信号 S / N の関係性を評価した。

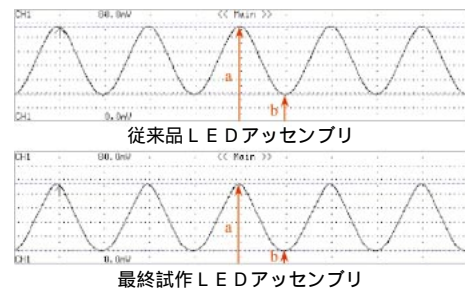


図11 受光素子アナログ出力波形
Waveform of PD analog output

その結果、信号振幅は従来品と同程度であったが、従来品がスリット板間距離の設計値0.3mm で S / N 比3 程度であるのに対し、試作光源ユニットでは、距離0.8mm まで同等以上の S / N 比が確保されている(図12)。

したがって、スリット板間距離の拡大および精度緩和については大幅な効果が得られることが明らかになった。

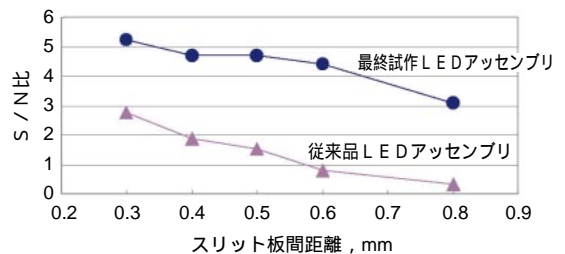


図12 スリット板間距離の影響(512パルス)

Influence of space between the slits (512 pulses/revolution)

4.2 温度特性

周囲温度を0～80℃で変化させたときの受光素子アナログ出力への影響は、従来品光源ユニットと比較して、出力の低下が極めて小さく良好であった(図13)。

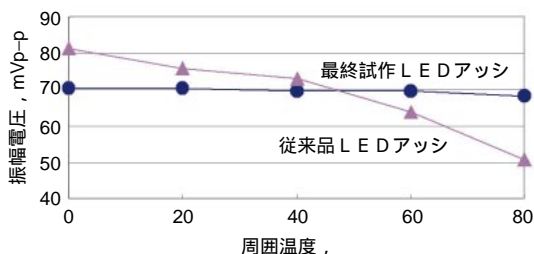


図13 周囲温度の影響

Influence of ambient temperature

4.3 LED劣化想定試験

LEDの劣化を想定し、光出力低下時の製品性能を検討した、その結果、LED光出力を初期の15%まで低下させても、A-B相位相違やパルスデューティへの影響は見られず、極めて良好であった(図14)。

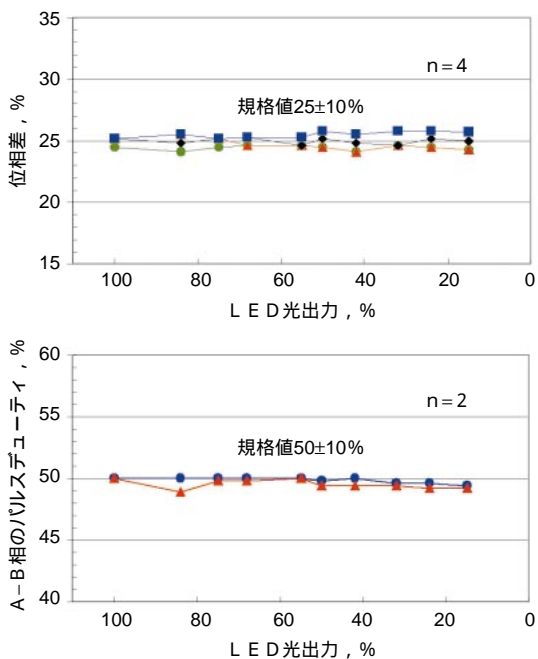


図14 LED劣化想定試験結果

Result of test assumed LED degradation

4.4 高分解能スリットへの適用

高分解能スリットへの適用について、2048パルスのフィルム製試作スリット板と組み合わせたところ、従来品光源ユニットではS/N比がほぼ0となるスリットギャップ0.2mmの条件でも、従来品512パルス同等の3近いS/N比が得られる

と推定され、フィルム製スリット板で従来比4倍の高分解能化が実現可能であると判断された(図15)。

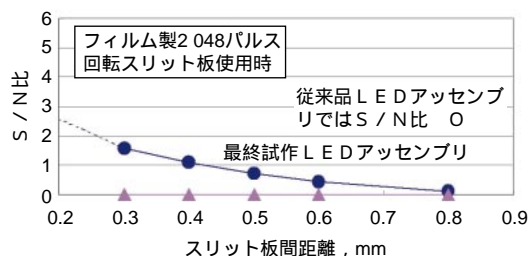


図15 高分解能スリット板への適用 (フィルム製2048パルス)

Application to high resolving slit

さらに、開発光源を4096パルス($p = 20 \mu m$)、および8192パルス($p = 10 \mu m$)品に適用した時の信号S/Nを従来品と比較して図16に示す。

スリットギャップは $p = 10 \mu m$ では式(1)に従い120 μm とし、 $p = 20 \mu m$ は従来品と同じ60 μm である。

開発した光源により従来比4倍の高分解能スリットにおいても同等の信号が得られ、しかもスリットギャップが倍になるため組立時のギャップ管理も大幅に緩和が可能となる。また、従来比2倍の20 μm ピッチに対しては回折像の利用はできないものの、大幅な信号S/Nの改善ができた。

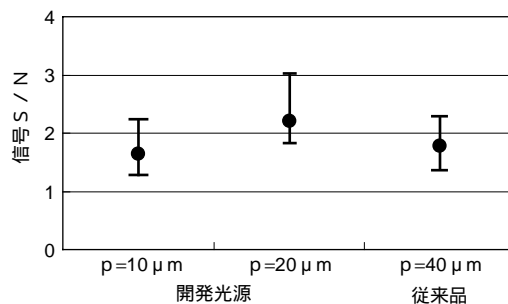


図16 高分解能スリットでの信号S/N

Signal S/N ratio in minute slit

5. 製品への適用事例

開発した高性能LEDを量産エンコーダに適用した事例を紹介する。

5.1 薄型動力モータ内蔵用エンコーダ

外形寸法: 44 × 36mm(図17)

分解能: 8192ppr(光学4096ppr)

- ・ 同分解能の従来品に対して、外径が1/2以下に小型化
- ・ 同外径の従来品に対して、光学分解能が約1.6倍に向上(従来品光源ユニットでは正常な

出力出す)

- ・LED位置調整構造廃止で、奥行11mm減、薄型化が実現
- ・スリット板間距離拡大・精度緩和により、生産性が向上

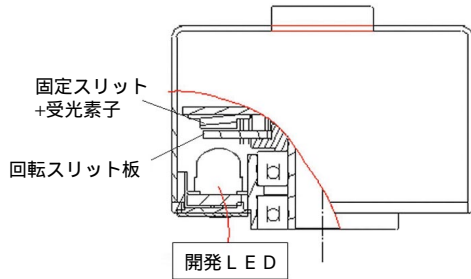


図17 製品への適用事例
Application example to product

5.2 サーボモータ用高分解能エンコーダ

外形寸法： 36.5×26mm

分解能：2048ppr(光学)

- ・スリット板間距離を4倍にすることができ、ガラス製回転スリット板のフィルム化が実現、コストダウン
- ・A - B相のパルスデューティ調整が不要に(従来品では、光線の斜入射により信号ばらつきが大きく、可変抵抗にてデューティ調整が必要)
- ・基板位置調整が不要

6. おわりに

高精度な光源ユニットを開発することによりロータリエンコーダの光学特性を大幅に改善した。

このことにより、ロータリエンコーダの小型化・高分解能化が可能になると共に、光源劣化時でも安定したパルスの出力が可能となった。

また、ギャップ精度管理の緩和によりフィルムスリットの使用も可能となり、より一層の低イナーシャ化が図れるようになった。製造面でも、組加工が不要となり、均一な照射光により光学系・電気系も無調整に出来るなどメリットも大きい。

レンズの素材やLEDチップの温度特性を吟味し、耐温・湿度性についても向上を図り、製品としての総合的な信頼性向上を目指した。

今後は取扱性・光学特性上有利な可視光LEDや可視光に対応する受光素子の適用を図り、モーション制御のキーデバイスとして信頼性の高いエンコーダを提供していきたい。

参考文献

- 1) 服部 昌, 山田和明, 桑野俊貴, 小舘香椎子: 高分解能ロータリエンコーダの開発, Koyo Engineering Journal, no. 16(2001)44.
- 2) クラウス・ヴェルナー, 小舘香椎子: Talbotアレイイルミネータとその応用, 光アライアンス1998.3-12.
- 3) M. Mansuripur, (訳) 社内順平: Talbot効果, OplusE, vol 23, no. 5(2001).
- 4) 板野 清, 海野邦明他: 光デバイス精密加工ハンドブック(1998)218.

筆者



山田和明*
K. YAMADA



服部 昌*
M. HATTORI



梁川 敏**
S. YANAGAWA

* 総合技術研究所 機械システム研究部

** 光洋電子株式会社 エンコーダ事業部
技術部 工学博士