

高輝度面照光LED表示灯の開発

馬野勝三^{*1)} 田辺伸一^{*2)} 松本吉弘^{*3)}

1. はじめに

当社は創業以来、制御用スイッチ、表示灯を初めとする各種制御機器・制御システムを製造販売し、今年創業50周年を迎えたことから新たに「HMIソリューション事業」の展開をコンセプトに「人に優しいHMI環境の創造」を目指して商品開発に取り組んでいる。

表示灯はヒューマン・マシン・インターフェイス（HMI）のマシン側（Machine）から人（Human）に対する情報伝達の手段となり、各種警報装置、その他制御盤に多数使用されている。ヒューマン・マシン・インターフェイスとしての表示灯は、確実に情報を伝達するために点灯時、消灯時の点灯確認が確実にできるように、輝度そして視認性の高いものが望まれている。

従来の表示灯は、光源として白熱球を用いたものとLEDを用いたものがあるが、昨今、市場では点灯寿命、振動等による球切れ、メンテナンス性等の理由で白熱球から点灯寿命の長いLEDの採用が増えている。従来品と比較した場合、LEDを用いた表示灯は白熱球を用いたものと明るさの面で、特に乳白色、アンバー色に関しては劣っており、白熱球並の明るさを要求する声が多く聞かれるようになってきた。

今回、LEDを用いた表示灯の高輝度化対策として、当社が長年培ってきた機構設計技術・精密加工技術・デバイス技術を用いて、現行品より高輝度な面発光LEDモジュールを完成させた。さらにホログラフィ技術を応用したホログラム光拡散板を用いた独自の光学設計により、高輝度面照光技術を確立した。

今回これらの技術をSLCシリーズ集合表示灯に応用し、当社現行品より3倍（300%）明るく、しかも白熱球より明るい高輝度面照光LED表示灯を完成させた。SLCシリーズ集合表示灯及びSLDシリーズ角形表示灯の外観写真を図1、図2に示す。

本報告では面発光LEDモジュールとホログラム光拡散技術について以下順次解説していく。

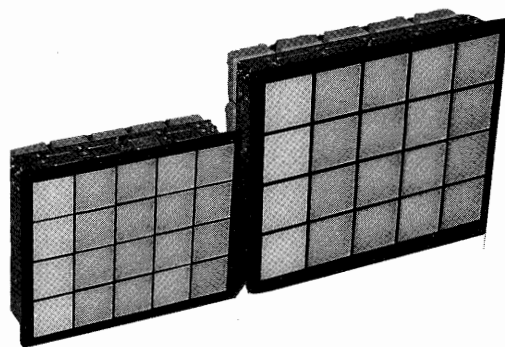


図1 SLCシリーズ集合表示灯

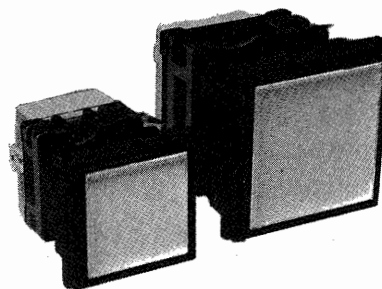


図2 SLDシリーズ角形表示灯

2. 開発コンセプト

高輝度面照光LED表示灯を開発するに当たり、市場から要求される内容を検討し、次に示す各項目を実現することを目的とした。

- 1) 高輝度化
- 2) 照光面均一化
- 3) 広視野角化
- 4) 薄型化
- 5) 省電力化

具体的に考慮する事項として、以下の項目をあげる。

・角形表示灯の中央部のみだけでなく、隅々まで均一面照光で高輝度化を図る。

*1) 商品開発部

*2) 商品開発部

*3) 商品開発部

・面発光LEDモジュール自体を高輝度化するために、LEDの配置、基板の光反射効率の向上によりLEDの光が効率よく照光面に照射するように検討する。

・LED定格通電電流（順方向電流）は現行LED表示灯と同じかそれ以下とし、省電力化を図る。

・面発光LEDモジュールの光をレンズユニット部で低損失に伝搬させるためにホログラム光拡散板を採用し、照光系全般にわたり解析を行う。

図3に開発コンセプトを示す。

今回開発した高輝度面発光フラットLEDモジュールを「Flat LEDモジュール」と呼び、高光透過効率ホログラム光拡散板を「ホログラム拡散板」と呼ぶ。

なお、参考までに従来例として図1に示したSLCシリーズ集合表示灯現行品の構成を図4に示す。

照光面となるレンズ部ユニットは、フロントプレート、記名板、色板で構成され、さらに、光源となるLEDモジュールや白熱球及びそれらを支えるハウジングから形成されている。以下、現行品について説明していく。

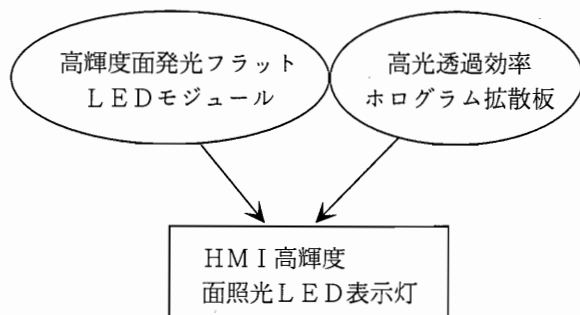


図3 開発コンセプト

3. 現行SLCシリーズLED表示灯

ここで、今回開発したFlat LEDモジュールと区別するため、現行SLCシリーズLEDモジュールを「ディスクリートLEDモジュール」（以下Discrete LEDモジュール）と呼ぶことにする。

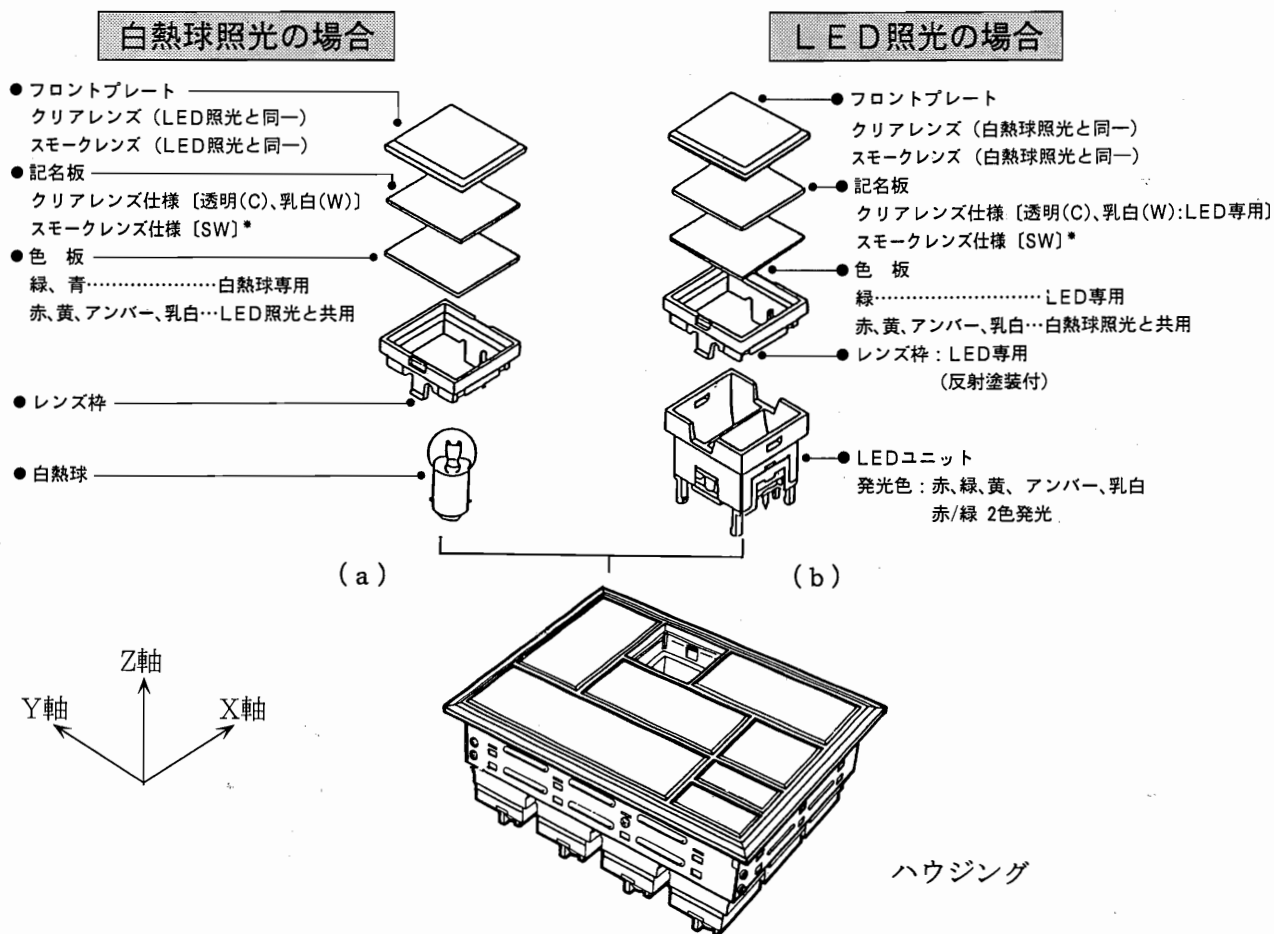


図4 SLCシリーズ構成図 (現行品)

3.1 Discrete LEDモジュールの構造

現行のLED仕様であるDiscrete LEDモジュールの構造を図5に示す。

Discrete LEDモジュールは $\phi 3$ mmのLEDランプをSLC30は8個、SLC40は16個を基板に実装し、さらにリフレクタを取り付けLEDの光をフロントプレート側に照射させている。

また、LEDランプが各々独立しているため、 $\phi 3$ mmの小面積エポキシ樹脂(Epoxy)面での拡散でしかも指向性が強く、照光面全体を近距離において均一な状態にするのは難しいが、照光面からの距離を長くし許容される範囲程度の均一化を実現している。

3.2 現行レンズユニット光拡散方法

現行仕様であるレンズユニットとその光拡散方法について述べる。

図4に示したように一般に、角形表示灯はLEDモジュールの前面に色板、記名板、及びそれを固定する為のレンズ枠、フロントプレートから構成されており、記名板に文字等を刻印して点灯時の情報内容を表示する。

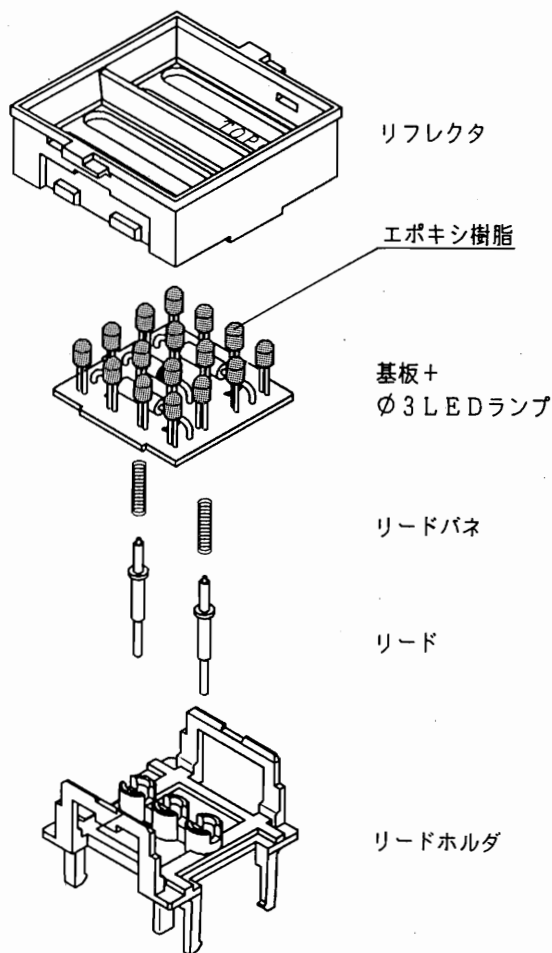


図5 Discrete LEDモジュール構造 (現行品)

しかし、表示灯の前面から見てLEDモジュールの発光ドットが見えると均一面照光とならず、文字も読みにくいものとなり決して「人に優しい表示灯」とは言えない。

現行品は、この問題点を解決するために記名板を乳白色に着色し、乳白の濃度を微妙に調整することでLEDの発光ドットが見えないよう、また均一照光をするように拡散板として用いている。これを以下、乳白色拡散板と呼ぶ。

さらに、乳白色拡散板の後ろの色板は、LEDの発光色に合わせ各色用意され、LED光が乳白色拡散板により乳白色化するのを防いでいる。

LEDモジュールの光がこの乳白色拡散板と色板を通過することにより光透過効率が落ちることは従来より知られていたが、LEDの発光ドットが見えることを防ぐためにこの組み合わせ構造を採用していた。

図6に現行レンズユニットに使用している各色板の光透過効率の波長特性を示す。これより、各色に関する光透過効率が平均して55%であることがわかる。

これら現状を考慮し、以下に述べていく高輝度面照光LED表示灯の開発を行った。

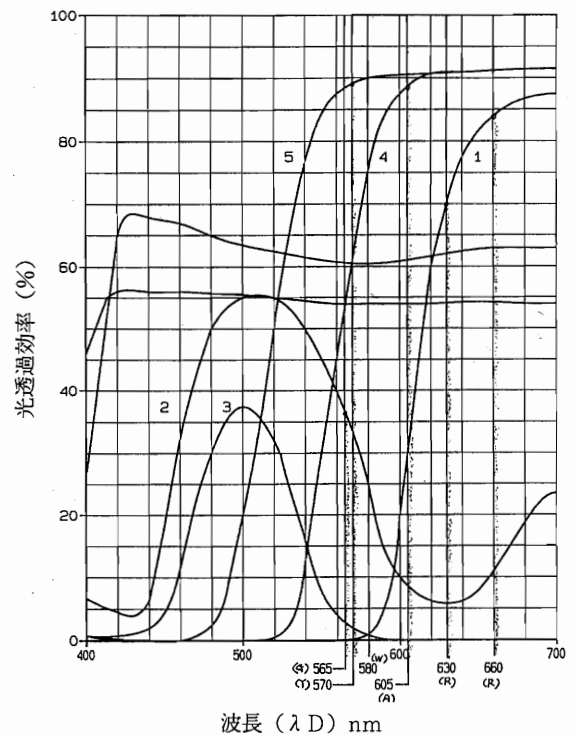


図6 色板の光透過効率の波長依存性

4. Flat LEDモジュールの開発

Flat LEDモジュールの高輝度化設計をする上で、特に次の2項目をあげ開発を進めた。

- (1) 均一面照光
- (2) 照光面とLEDモジュールの位置関係

4.1 Flat LEDモジュールの構造

今回開発したFlat LEDモジュールは、チップオンボード(COB)とし、LEDベアチップを基板上にボンディング(接合)することにより実装する構造である。

図7にFlat LEDモジュールの構造を示す。

基板はLEDベアチップ実装面を白色レジスト塗装し、また、リフレクタにインサート成形した一体構造とすることで照光面側(フロントプレート側)への光の反射効率を上げている。

また、LEDベアチップ実装面にエポキシ樹脂で封入することにより、Flat LEDモジュール面全体を均一に発光させている。

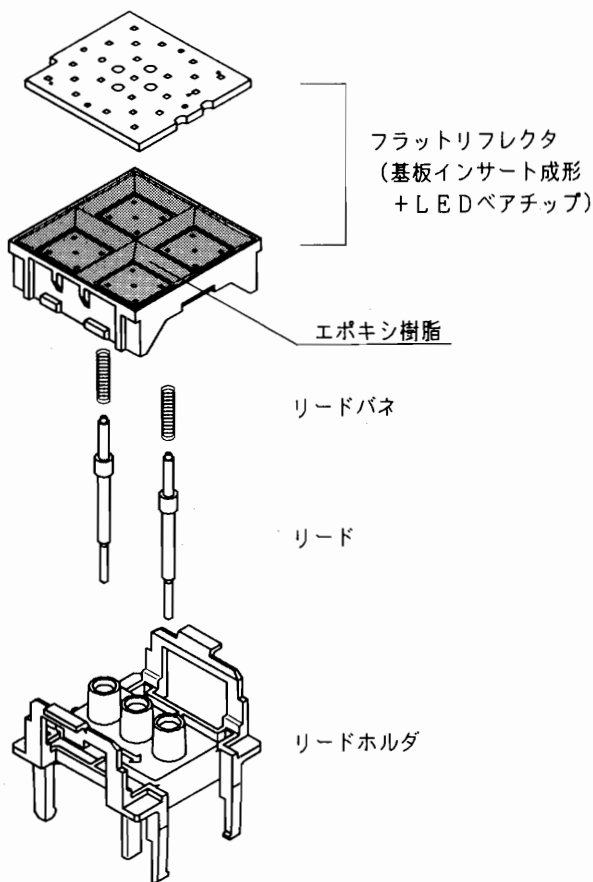


図7 Flat LEDモジュール構造(新規開発品)

4.2 照光面とLEDモジュールの位置関係

角形集合表示灯で照光面の隅々まで高輝度化を実現するためには、照光面とFlat LEDモジュールの位置関係が非常に重要な設計上の要素となる。

Flat LEDモジュールの位置を決定するにあたって、照光面からFlat LEDモジュールの位置(距離)に対する次の2項目の検討が必要となる。

- (1) LEDベアチップの配置と均一面照光の関係(図4における座標軸X-Y平面に対する検討)
- (2) Flat LEDモジュール位置と均一面照光の関係(図4における座標軸Z軸に対する検討)

以下に、各検討要素に対する結果を示す。

4.2.1 LEDベアチップの配置と均一面照光の関係

Flat LEDモジュールのインサート基板上でのLEDベアチップの配置については、各ベアチップからのLED光の指向性を考慮し、照光面に均一にLEDの光が配向されるようにSLC30シリーズは8個、SLC40シリーズは16個を配置した。

LEDベアチップより出射した直接光は、エポキシと空気との境界面における屈折により臨界角 $\alpha_c = 39^\circ$ 以上で全反射となる。この角度内でLEDの直接光が、記名板に均一に届く範囲内に設計したときのLED直接光の範囲を表すと図8に示す円内になる。実際は、全反射した光についてもリフレクタ・基板からの照光面への反射効果はあるが、ここでは照光面全体に対する直接光のみの検討であり、最低限確保できる光の範囲を示している。臨界角は以下の式にて算出した。

$$\sin \alpha_c = n_{air} / n_{ep} = 1.0 / 1.6$$

$$\therefore \alpha_c = 39^\circ \quad (\text{エポキシ屈折率: } n_{ep}=1.6, \text{ 空気屈折率: } n_{air}=1.0)$$

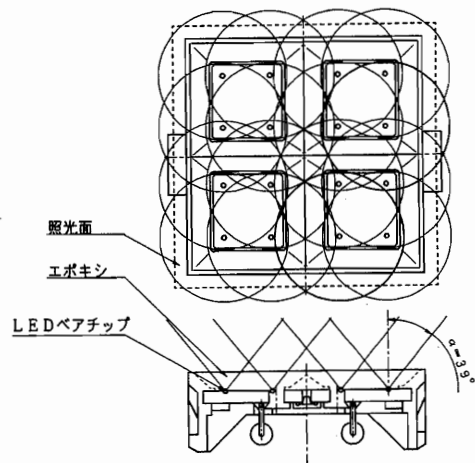


図8 LEDベアチップの配置と照光範囲

4.2.2 Flat LEDモジュール位置と均一面照光の関係

Flat LEDモジュールを照光面に近づければ近づけるほど高輝度となるが、近づけ過ぎた場合、照光面における光の拡散の限界を超えてしまうため、LEDベアチップが粒(ドット)となって照光面にはっきりと見えてしまう。

照光面からFlat LEDモジュールまでの各発光色における距離と輝度の関係を図9に示す。照光面からFlat

LEDモジュールが1mm離れるごとに、輝度が2~3%ずつ減衰している。

図中発光色5種類に関する記号を、赤(R)・緑(G)・アンバー(A)・黄(Y)・乳白色(W)とする。

今回これら2項目の検討結果から、Flat LEDモジュールのベアチップ配置と照光面からの最適な位置(距離)を決定した。

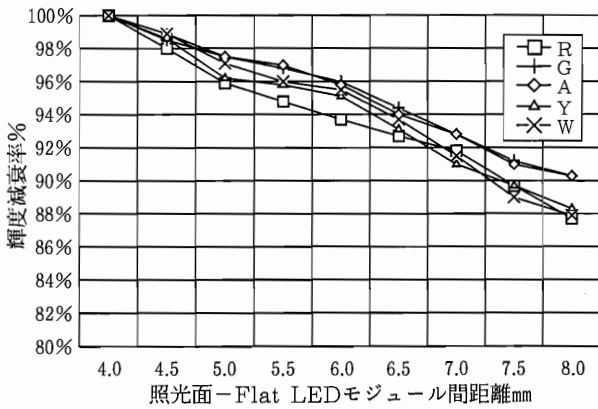


図9 照光面までの距離に対するLED輝度減衰率

また、Flat LEDモジュールはチップオンボード方式の面発光であり、現行Discrete LEDモジュールに比べ約9mm照光面に近づけることができ、照光面とFlat LEDモジュール基板面との間隔はDiscrete LEDモジュール基板面と比較し、約1/3の薄型化を達成している。これらの比較を図10に示す。

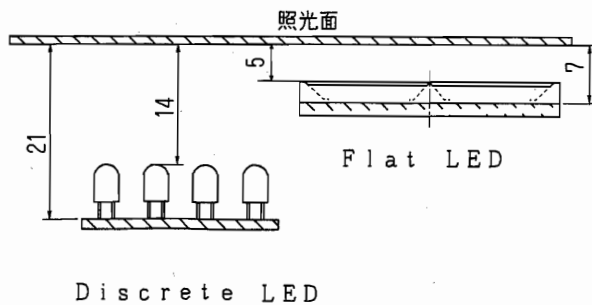


図10 照光面に対する各LEDモジュールの配置

製品仕様としては、現行品との互換性を保つため基本的にDiscrete LEDモジュールと同仕様としているが、Flat LEDモジュールについては、定格電圧24Vのみであるが内部回路にダイオードブリッジを組込むことにより、AC/DC共用仕様とした。

Flat LEDモジュールの代表的な回路を図11に、Flat LEDモジュールに搭載したLEDベアチップの波長(λd)を表1に示す。

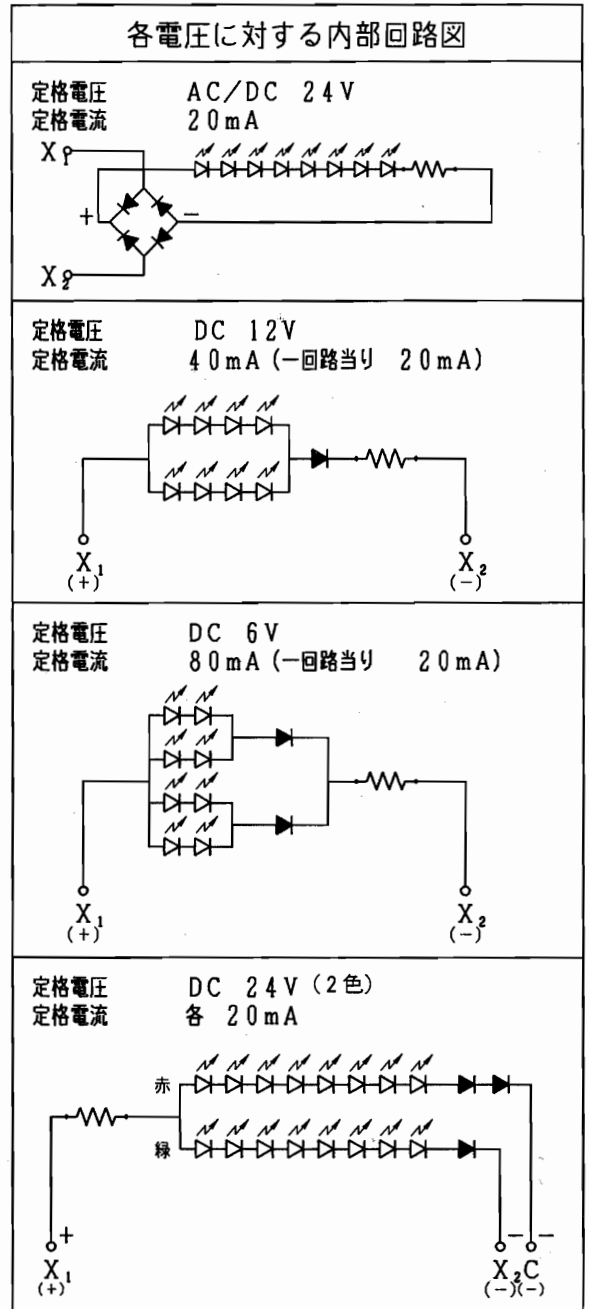


図11 Flat LEDモジュール内部回路図

表1 LEDベアチップ各色の波長

| 色記号 | 波長: λD (nm) |
|----------|-------------|
| R (赤) | 630 |
| G (緑) | 567 |
| A (アンバー) | 604 |
| Y (黄) | 580 |
| W (乳白) | 589 |

5. ホログラム拡散板の導入

ホログラム技術を用いた光学素子は、一般にHOE (Holographic Optical Element) と呼ばれ、例えばコンパクトディスク (CD) プレーヤの光ピックアップレンズ等に使用されている。

5.1 ホログラム拡散板とは

ホログラムとは、パターン情報記録法であるホログラフィ技術により作成される一種のフィルム、プレートであり、He-Cdレーザ二光束干渉光学系により干渉縞パターンとして記録している。

ホログラムには、体積ホログラム (Volume Hologram) と表面ホログラム (Surface Relief Hologram) があるが、今回採用したホログラム拡散板は干渉縞パターンをポリカーボネイト等の透明樹脂上に形成した表面ホログラムである。

透明樹脂上にホログラムを形成するため、光透過効率は最高92% (平均90%) に達し、また拡散板表面からの後方反射を減らす効果もある。またホログラム拡散板は光の波長依存性がなく、表1に示したLED波長全域において使用可能である。

ホログラム拡散板は入射した光を広範囲に拡散制御可能であり、表示灯として最適な拡散角を設定した。

図12にホログラム拡散板の利用例を示す。

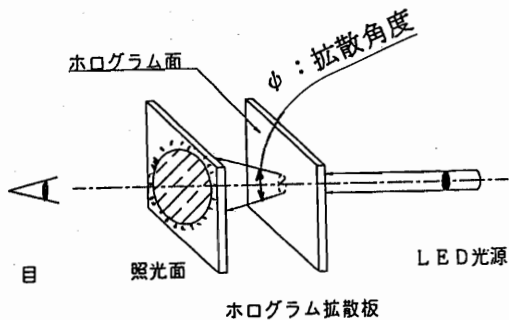


図12 ホログラム拡散板の利用例

5.2 ホログラム拡散板導入による光透過効率の改善

3.2節の中で述べたように、各色板の波長とFlat LEDモジュールのLEDベアチップ各色の波長とを組合せた場合、光量の損失が大きくなる。

しかしながら、LEDの発光波長に適した損失の少ない色板を作り、なおかつ乳白色拡散板の光透過効率を上げることは限界がある。

そこで今回、乳白色拡散板と色板を使用するという概念を取払い、光透過効率の改善を実施すべく新規光学部品であるホログラム拡散板の導入を検討した。

乳白色拡散板、色板をホログラム拡散板に変えて使用する時のレンズユニット構成を図13に示す。また、現行レンズユニットとホログラム拡散板を用いたときの光透過効率を比較したものを、図14に示す。

現行のレンズユニットでは光透過効率が平均55%であったものが大幅に改善され、LEDモジュールが本来発している光量の平均90%の光透過効率となり、ホログラム拡散板は低損失光拡散板であることがわかる。

また、ホログラム拡散板を導入することにより、色板が不要になることから、LEDモジュールの発光色によらずレンズユニットを統一することが出来、ユーザ各位の在庫管理の面からも利点となる。

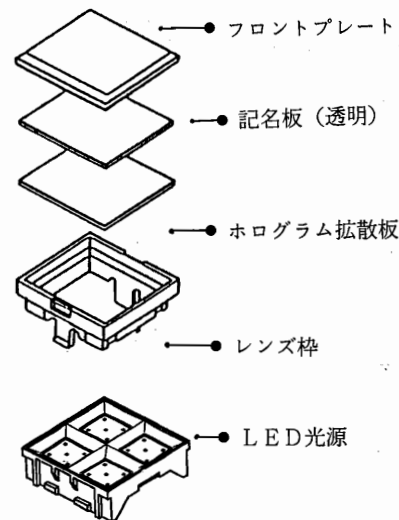


図13 ホログラム拡散板を使用したレンズユニット構成

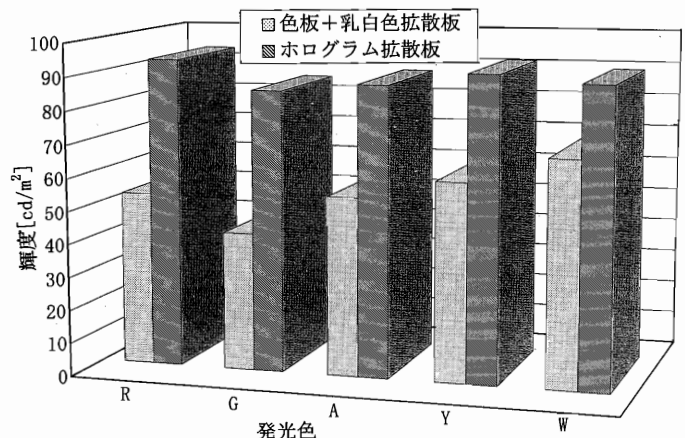


図14 ホログラム拡散板導入による光透過効率の改善

6. 超高輝度化の実現

以上4節及び5節で述べたようにチップオンボード方式のFlat LEDモジュールとホログラム拡散板を融合させることにより、SLC表示灯において超高輝度化を実現させることができた。

現行品との比較のため、次に示す三種類の構成についての輝度比較を行った。

構成A【今回開発の超高輝度仕様】：

Flat LED+ホログラム拡散板+透明（記名板）
レンズユニット（図13参照）

構成B【現行SLCシリーズLED照明仕様】：

Discrete LED+色板+乳白色拡散板（記名板）
レンズユニット（図4（b）参照）

構成C【現行SLCシリーズ白熱球仕様】：

白熱球+色板+乳白色拡散板（記名板）
レンズユニット（図4（a）参照）

図15に各構成に関する各色別の輝度を示す。

今回開発したFlat LEDモジュールの高輝度化について注目すべき点としては、現行LEDの構成Bに対して、特に高輝度化の要望が大きい緑色（G）が5倍（500%）を筆頭に、アンバー色（A）、乳白色（W）のLEDモジュールに対して、絶大なる効果を発揮していることであり、5色全体でも平均して3倍（300%）の高輝度化が達成できた。

また、従来表示灯として一番明るいと言われてきた構成Cの白熱球仕様に対して、構成Bの現行LEDモジュールの輝度は、赤色（R）・緑色（G）の2色についてのみ上回っていたが、構成Aの超高輝度化LEDモジュールでは、全色について最高の輝度を実現した。

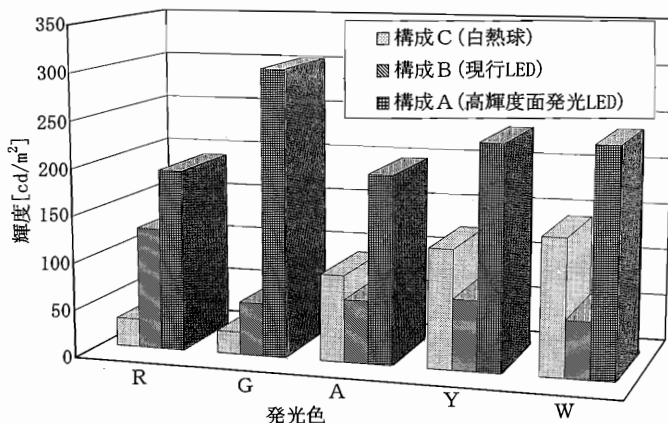


図15 各構成での輝度比較

また、輝度の視野角分布特性を図16に示す。

この図はアンバー色の表示灯からの輝度を正面のみならず180°の角度範囲で測定したものである。図から明らかのように現行の表示灯と比較して正面の輝度向上に加えて、斜め方向から見た場合も従来よりはるかに視認

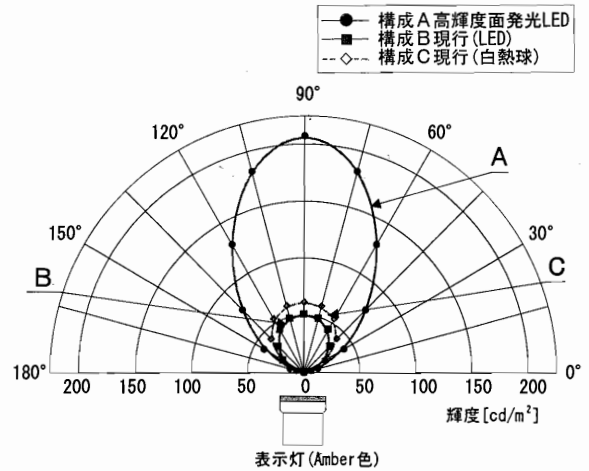


図16 輝度視野角分布

次に、消費電力について白熱球と比較した場合LEDは約1/2と少なくすむ。省電力であることは、長寿命であることと同様にLEDを採用する際の大きな利点である。

図17に現行LEDの構成Bと超高輝度の構成Aとの電流値に対する輝度特性を発光色緑（G）について示す。現行定格仕様電流である一回路当たり20mAでの構成Bの輝度を基準として考えた場合、同仕様での高輝度化は明らかであるが、なおかつ着目するところはこの現状の輝度をそのまま構成Aに照合すると通電電流値約10mAにおいて確保でき、現行LED以上の省電力化が達成できた。

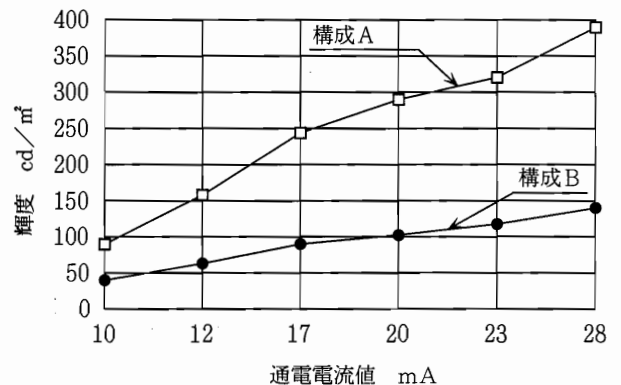


図17 電流値-輝度特性

これら実現した内容をまとめると、製造物責任法（PL法）の観点からも、機械の状態を認識しやすい高輝度均一面照光と高視認性そして、省電力化を含め全てにおいて現行のLED仕様および白熱球仕様を上回ったこととなり、ユーザ各位のニーズを十分に満たすHMI高輝度面照光LED表示灯が生まれたことになる。

そして、このHMI高輝度面照光LED表示灯は、発売以来10数年、市場で多数使用して頂いているユーザ各位が、メンテナンスでLEDモジュールを交換される場合の、互換性を保証している。

7. 今後の課題と展望

今回開発したFlat LEDモジュールは、6節最後で述べた理由で互換性を優先した方式をとり、現在市場で使われているSLC集合表示灯本体にLEDモジュールのみでメンテナンス交換を可能としたものであるが、現行の表示灯本体内部にこのLEDモジュールを組み込んだ場合には、現行の約1/3の薄型化を実現したことより、実際には内部にある程度の空間を生じている。図18参照。

今後の開発としては、LEDモジュールの薄型化に伴う表示灯全体の短胴化・軽量化を図る必要がある。

このテーマについては、新規開発途中のHNシリーズ（パネル丸穴取付角形表示灯）表示灯において、高輝度・短胴化となっている。参考として、図19にHNシリーズFlat LEDモジュールの構造図を示す。

今後の大きな展望としては、各LEDチップメーカーで開発が進んでいる青色LEDのFlat LEDへの導入も含め、高輝度の赤・緑・青の光の3原色の登場による表示灯のフルカラー化である。

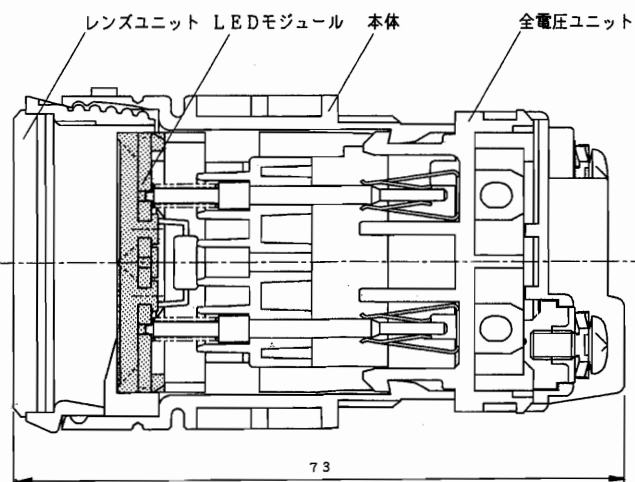


図18 SLC40シリーズ 表示灯

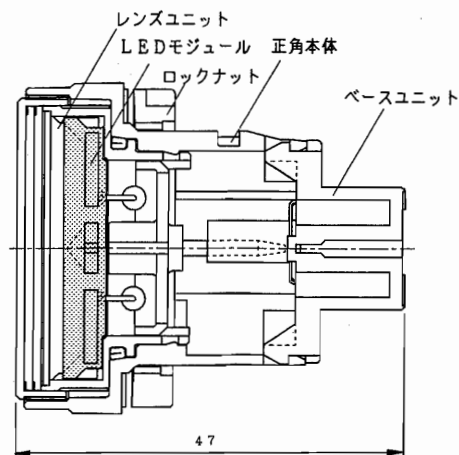


図19 HNシリーズ表示灯

8. おわりに

最後にSLCシリーズLED高輝度化の開発にあたり、LED実装技術や、基板インサート成形技術の確立をして頂いた生産技術センター、データの提供も含め、ホログラム拡散板についての導入に御努力頂いた研究部、品質を確認して頂いた品質保証センター他、関係部署の皆様がこの場を借り深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木正根：実践ホログラフィ技術
オプトロニクス社
- 2) Brian Kluepfel and Franz Ross:
HOLOGRAPHY MARKETPLACE
Fourth Edition
ROSS BOOKS
- 3) 辻内順平：ホログラフィックディスプレイ
産業図書