蒸着反射鏡を用いた高効率投光器の開発

正会員 松下 信夫* 専門会員 高橋 貞雄*
専門会員 梶山 宏介** 瀬名波 進***

Development of Highly Efficient Floodlights with Reflector Using Physical Vapor Deposition Method

Nobuo Matsushita (Member) Sadao Takahashi (Fellow Member)
Hirosuke Kajiyama (Fellow Member)

(Toshiba Electric Equipment Corp.)

Susumu Senaha

(Yokohama Kiko Company Ltd.)

ABSTRACT

The paper deals with physical and chemical characteristics of a new reflector produced by physical vapor deposition method and highly efficient floodlights developed as an application of the new reflector.

The new reflector surface is composed of three layers; aluminum substrate is coated with special heat resistance resin to get the smooth surface, on which super pure aluminum (99.99%) and silica glass are deposited in turn to get high reflectance and durability. It is found from the experiments that the new reflector takes some advantages over the conventional anodized aluminum reflector, especially in reflection properties and anticorrosion.

As a result, highly efficient floodlights for 1,000-watt HID lamps have been developed.

1. ま え が き

一般に反射系を用いた照明器具の効率向上には、大別して反射鏡形状の最適化と使用する材料、表面処理の問題がある。HID ランプを使用する投光器や、高天井用反射がさのような照明器具においても同様と考えられる。この二つの問題はちょうどくるまの両輪のように具体的な器具設計では密接に関係しあっている¹⁾²⁾。

従来、HID ランプ用照明器具の反射鏡には、主としてアルミニウムを電解研磨または化学研磨し、陽極酸化皮膜処理を行っており、現在でもこれが主流をなしている。しかし、最近では表面の耐食性と清掃容易性から、陽極酸化皮膜の代わりにけい酸皮膜を形成したもの³⁾⁴⁾や、反射特性改善のために、基板表面に高反射率物質を蒸着したもの⁵⁾⁶⁾が発表されている。

このたび、1,000 W HID ランプ用投光器を対象にして、反射特性と耐久性の両面における改善を目標に種々検討した結果、物理蒸着法(Physical Vapor Deposition Method, 以下 PVD 法と略記)を応用して新しい反射鏡をつくることができた。これは従来のアルミニウムの電解研磨鏡に比べ、全反射率、鏡面性および耐食性において著しい向上がみられた。所要配光を考慮の上、

この反射鏡を応用して新形の投光器を開発した。

2. HID ランプ用投光器における反射鏡の要件

投光器は反射光を効果的に制御するため、反射率と鏡面性の高い反射鏡が必要である。また、ほとんど屋外で使用されるので、ランプから放射される紫外線や熱に耐えるだけでなく、耐候性、耐水性や耐食性にすぐれ、初期の反射特性を維持できることが重要である。また、いくら反射特性や保護性能にすぐれても、工業的生産にできなければ使えない。これらから HID ランプ用投光器における反射鏡の要件として、次の三つを考慮することにした。

- (1) 反射特性……高い反射率と鏡面性を持つこと
- (2) 反射面の保護性……初期の反射特性を維持できること
- (3) 生産性……加工性および量産に適していること

現在、主流をなしているアルミニウム反射鏡には、一般に工業用純アルミニウム(A 1080)が用いられている。純度はおよそ 99.8%で、電解研磨により反射率と鏡面性を高め、陽極酸化皮膜処理により、反射面上に厚さ数 μm の酸化皮膜を形成して保護を行なっている。このアルミニウム反射鏡は、アルミニウムの純度を高めれば反射率と鏡面性が高くなる。

図 1 にアルミニウムの純度と反射率の関係⁷⁾を示す。この図によれば、工業用アルミニウム(A 1080)に対して純度が 99.99%

* 東芝電材研究所

** 東芝電材施設照明器具事業部

*** 横浜機工研

本論文の一部は昭和55年照明学会全国大会において発表したものである。

図1 アルミニウム純度と反射率⁷⁾

場合、反射率は約6%高くなるので、投光器の効率改善が期待できる。しかし、このような高純度アルミニウム板を入手することはまず不可能である。また、酸化皮膜を薄くして反射率を高める方法は、保護性能が低下するので限界がある。これらから、アルミニウム板を用いた電解研磨鏡で、現在以上に反射率と鏡面性を高めることはきわめて困難と考えられる。

一方、けい光灯具などでは真空蒸着法などにより、反射面として高純度アルミニウムを付着させ、透明樹脂塗膜で表面を保護し高い反射率を得る方法があるが、これは HID ランプ用投光器の反射鏡としては耐候性、耐食性また耐熱性などに難がある。この透明樹脂塗膜の代わりに透明ガラスを用いれば、すぐれた保護性能が期待される。著者らは PVD 法を応用して石英ガラスを保護膜として形成した⁸⁾。

3. 蒸着反射鏡の製作

PVD 法を種々検討した結果、電子ビーム法により高純度アルミニウムと石英ガラスを蒸着した。PVD 法を大別すると真空蒸着法、スパッタリング法、そしてイオンプレーティング法に分けられる。最近ではこれらの応用が電子、光学分野だけでなく、表面硬化、装飾分野などにも広がっている⁹⁾が、照明器具の応用は非常に少なく、ごく一部に使用されているにすぎない。PVD 法を応用する場合、付着させる物質や使用条件など、対象となる製品の要件を一つ一つ評価、検討して、最もふさわしい方式を選択しなければならない。1,000 W の投光器用反射鏡の場合、直径 500~600 mm、長さ約 300 mm と比較的大きな寸法であることと、その形状などから蒸着のしやすさを種々検討した結果、電子ビーム蒸着方式を採用することにした。この方式の特長は高融点材料を比較的短時間に蒸着でき生産性も良いことである。

図2 蒸着工程

図2に蒸着工程を示す。基板を脱脂、水洗などの前処理を行った後、耐熱性樹脂を塗布し、乾燥、焼付けして下地層を形成した。この下地層は反射面を平滑にするが、その表面が被蒸着面となるので、樹脂には反射膜との密着性や脱ガス性の良いことが必要である。また1,000 W 用投光器の反射鏡は、使用条件によっては200°Cに達する部分があり、密着性の良い特殊耐熱性樹脂を用いた。

次に真空装置内において、99.99%の高純度アルミニウムを蒸着して反射面を形成し、さらに石英ガラスを蒸着して保護膜を形

成した。アルミニウムや石英ガラスの蒸着に関しては、今までにいろいろ研究がなされ、真空度、たい積速度、基板温度および入射角などが重要な因子であるといわれているが、具体的な実験、評価をくり返し適切な条件を求めた。

4. 蒸着反射鏡の諸特性¹⁰⁾

試験用試料は 50 mm×100 mm×1.2 mm の平板と、投光器用反射鏡を 50 mm×100 mm に切断したものを用いた。図2の工程に基づき、下地層と反射膜および保護膜を形成した。膜厚測定の結果、保護膜は約 1.2 μm であった。図3に試料の断面写真を示す。また、諸特性の比較用に同一寸法のアルミニウム板 (A1080 P) を電解研磨後、陽極酸化皮膜処理を施したもの (以下、アルマイト品と記す) を用いた。酸化皮膜は約 3 μm であった。以下、特に記述のない場合には平板試料による評価結果である。

図3 試料の断面写真

4.1 光学的性質

図4に光学的性質として、全反射率と20°光沢度で評価した結果を示す。全反射率は二重積分球式反射率計 (図5) を使用し、全反射率97%の硫酸バリウムを標準とした。20°光沢度は JIS Z

図4 全反射率と20°光沢度

図5 全反射率の測定装置

8741 に準拠した光沢度計を使用した。アルマイト品に比べて試料は全反射率が10%高い。参考として米、西独のアルマイト同等品と比較したが、試料のほうが平均7%高い。高純度アルミニウムを蒸着した効果が明らかで、また石英ガラス膜の光損失は約1%と非常に少なく、これも高反射率に寄与していることがわかった。

図6 分光反射率曲線

図6は近紫外域、可視域の分光反射率の測定結果である。石英ガラス膜により干渉を生じ波状の反射率曲線になっているが、肉眼では干渉色は観察されなかった。また、赤外域の反射率も高いことがわかり、この方面への応用も考えられる。

20°光沢度も試料のほうが60%高く、下地層の平滑効果がすぐれていることが裏づけられた。

4.2 化学的性質

表1は、各種表面処理の促進評価によく用いられる薬品による滴下試験結果である。

表1 耐食性試験

	試料	アルマイト品
塩酸	◎	○
硫酸	◎	◎
硝酸	◎	◎
水酸化ナトリウム	◎	△
塩化ナトリウム	◎	◎
塩化第二銅	○	△
水	◎	◎

水以外はすべて10%溶液を用いた。判定：◎優、○普通、△劣

試料は平板、切断片の両方を用いた。試験はすべて10%溶液を用い、常温下で滴下30分後の表面観察により3段階に評価した。薄膜でも石英ガラスの保護効果は強く、酸、アルカリ、塩などに対してアルマイト品をしのぐ耐食性が認められた。次に耐食性評価として、サンシャインウェザメータ試験を行なった。槽内温度40°C、散水サイクルは120分ごとに18分間の条件下で、1,000時間試験前後の光沢度の変化を測定した。全反射率による比較では、反射表面の変色、付着物などにより、前回測定値より高くなる場合がある。また投光器用反射鏡のように、鏡面性の低下が配光に大きく変化を及ぼす場合には、鏡面性の変化を評価するほうが適切であると考え光沢度を比較した。

表2 促進耐食性試験

	比 光 沢 度		
	0H	1000 H	洗 浄 後
試料	1.00	0.91	0.95
アルマイト品	1.00	0.72	0.74

サンシャインウェザメータ使用

条件 槽内温度40°C (ブラックパネル62°C)

散水18分/120分サイクル、160 cc/分

表2に試験結果を示す。アルマイト品の場合、試験前の光沢度を1.00とすると、試験後では0.72と28%の低下が生じた。試料の場合には試験後0.91とわずか9%の低下で、アルマイト品に比べて26%低下率が少なかった。これは石英ガラス膜と酸化皮膜の組成上の差異に加えて、表面の平滑性も影響していると考えられる。

4.3 機械的性質

試料の平滑性を調べるため、指針式表面粗さ測定機により表面粗さを測定した。図7に測定結果を示す。表面粗さを最大高さ(R_{max})で比較すると、アルマイト品は0.1 μm 、試料は0.02 μm で試料のほうが5倍滑らかであった。これより下地層の平滑性の高さと石英ガラスが平滑に蒸着されていることが考えられる。また図4の鏡面性の違いも表面粗さの違いから確かめられた。

図7 表面粗さ曲線

表面が平滑であることは、ほこりや汚れが付着した場合、容易に取り除けると思われる。耐食性評価試験後の試料を水洗すると、試料は光沢度が0.95まで回復した。

さらに投光器とした場合の清掃性比較実験では、アルマイト反射鏡に対して、蒸着反射鏡はふき取り回数が1/5~1/10でほぼ初期状態に回復することが確認できた。これらから高い平滑性は鏡面性を高める効果と、清掃性が容易になる効果を持つと考えられる。

密着性は重要な特性であり、そのため各種表面処理にはいくつかの密着性試験方法が決められている。しかし、塗装やめっき、アルマイトなどに比べて、蒸着膜に対しては決まった方法がないため、著者らは目視で明らかに良否がわかる、セロテープによる引きはがし方法と、クロスカット方法の2方法を用いて試験した。すべてはく離は見られず、10 mm×10 mmのクロスカット後、セロテープによる引きはがし試験でもはく離はなかった。図8に

図8 密着性試験

左側は10×10のクロスカット後、セロテープによる引きはがしを行なった反射鏡表面を表す。右側は同試験に用いたセロテープである。

この試験結果例を示す。

耐熱性試験として1,000 W HID ランプ用投光器の昇温曲線(約5 deg/分)に基づいて200℃まで加熱した。試料は平板、切断片両方用いたが、はく離や割れ、変色などは観察されなかった。

耐摩耗性については、ガーゼに500 g~1,000 g/cm²の荷重を加えたしゅう動試験で、100 サイクル後の傷の有無を観察した。試料、アルマイト品ともに異常なかった。

以上述べた諸特性は主に初期特性評価であり、経時変化を含めた特性評価は逐次データを蓄積していくつもりである。

5. 投光器用反射鏡の設計

4.1 より試料とアルマイト品の反射特性の違いがわかったが、この差が配光上どのように影響するかを調べるため、同一形状の蒸着反射鏡とアルマイト反射鏡の配光を測定した。

図 9 蒸着反射鏡とアルマイト反射鏡の配光比較

図 9 に配光曲線を示す。アルマイト反射鏡に対して蒸着反射鏡は中心光度が30%高く、そのため1/10 光度ビーム角は27%狭くなり集光性が非常に高い。また器具効率は6%向上した。著者らは単に中心光度の増加による極端な狭角化より、アルマイト反射鏡程度に中心光度を低減させ、その方向の反射光を所要のビーム角度内に分配するほうが使いやすと考え¹¹⁾、反射鏡の検討を行なった。そのため反射鏡に複数個の突出傾斜面を形成し、傾斜面により反射光を制御する方法をとった。

図 10 反射光計算説明図

図 10 の x, y, z 座標において、光軸上の光源 S から反射鏡の任意の点 P に達する光線 $\overline{SP}$ 、反射点 P の法線 $\overline{PN}$ 、反射光線 $\overline{PR}$ が yz 面に投影された線分と z 軸とのなす角をそれぞれ、 θ, δ, T とし、 xy 面に投影された線分と y 軸とのなす角をそれぞれ φ, ε, H とする。 $\overline{PN}, \overline{SP}$ の方向余弦は次のように表わせる。

$\overline{PN}$ の方向余弦 ($\cos \delta \cdot \sin \varepsilon, \cos \delta \cdot \cos \varepsilon, \sin \delta$)

$\overline{SP}$ の方向余弦 ($\cos \theta \cdot \sin \varphi, \cos \theta \cdot \cos \varphi, \sin \theta$)

また、 $\overline{PN}$ と $\overline{SP}$ のなす角を i とすれば、

$$i = \cos^{-1} K$$

ここに、 $K = \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \varepsilon + \cos \theta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \varepsilon + \sin \theta \cdot \sin \delta$ 、よって $\overline{PR}$ の方向余弦 (α, β, γ) は次のように表わせる。

$$\alpha = 2 \cdot \cos \delta \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos i - \cos \theta \cdot \sin \varphi$$

$$\beta = 2 \cdot \cos \delta \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos i - \cos \theta \cdot \cos \varphi$$

$$\gamma = 2 \cdot \sin \delta \cdot \cos i - \sin \theta$$

これらより、求める (T, H) は、

$$\left. \begin{aligned} T &= \sin^{-1}(\cos \gamma') \\ H &= \tan^{-1}(\cos \alpha' / \cos \beta') \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

となる。ここに、 $\alpha' = \cos^{-1} \alpha, \beta' = \cos^{-1} \beta, \gamma' = \cos^{-1} \gamma$ である。この(1)式により、反射点 P への入射光と点 P の傾斜角が変わった場合、反射光の光軸からの変化が求められる。

また、反射鏡各部における反射光分布は反射面への入射角、反射特性に加えて光源の輝度分布によって変化する。このため、反射鏡各部の中心光度への影響を検討した。反射鏡に輪帯状のしゃ光板を取り付け、幅10 mmの輪帯反射面部からの反射光を測定した。図 11 に測定結果を示す。

図 11 反射面各部の中心光度への寄与率

この場合には、角度 $\theta = 10 \sim 20^\circ$ の範囲が中心光度によく寄与していることがわかった。こうして求めた寄与率の高い範囲で、(1)式による反射光を検討した結果、突出傾斜面は $5 \sim 15^\circ$ の傾斜をもつ場合に、アルマイト反射鏡程度の中心光度を得、かつ1/10 光度ビーム角方向に反射光を制御できることがわかった。こうして得られた突出傾斜面を持つ反射鏡の例を図 12 に示す。

図 12 突出傾斜面をもつ反射鏡

図 13 突出反射面の flushed area

反射鏡上に、中心軸に対して放射状に24個の突出傾斜面を形成した。この反射鏡に高圧水銀ランプを挿入した場合の flushed area を観察した結果を図 13 に示す。

突出傾斜面は角度 $\theta=0^\circ$ では輝いていないが、 $\theta=4^\circ$ で輝きはじめ、 $\theta=10^\circ$ ぐらいでは $1/3 \sim 1/2$ が分散して輝き、反射光が増加する。 $\theta=20^\circ$ でも突出傾斜面の $1/2$ ぐらいは輝くので、引き続き反射光は増加する。

図 14 突出傾斜面の有無による配光比較

図 14 は、突出傾斜面の有無による配光を測定したものであるが、突出傾斜面により $\theta=0 \sim 7^\circ$ の光が減り、 $\theta=8 \sim 45^\circ$ の光が増えている。この結果、極端な狭角形配光を改善することができた。

6. 1,000 W HID ランプ用投光器の開発

以上述べてきたような検討をさらに押し進め、1,000 W HID ランプ用投光器を開発した¹²⁾。図 15 に新しい投光器の外観を示す。狭角形、中角形そして広角形すべてに突出傾斜面を形成しているが、特に中角形は開口部付近につち目状反射面を設けて、所要のビームが得られるように工夫した。これらの投光器は当社従来品に比べて、1/10 光度ビーム効率で平均 8 % 向上し、器具効率で平均 5 % 向上している。

(a)

(b)

(c)

図 15 新形投光器の外観

(a) 狭角形 (b) 中角形 (c) 広角形

7. 結 論

著者らは照明器具、特に HID ランプ用投光器の効率向上のために、反射鏡材料および表面処理の面から種々検討してきた。その結果、PVD 法を応用してアルミニウム板に下地層を施し、反射膜として 99.99% の高純度アルミニウムを蒸着し、保護膜として石英ガラスを蒸着した反射鏡を開発した。これはアルマイト反射鏡に対して、次のような特徴を持つことがわかった。

- (1) 99.99% の高純度アルミニウムを蒸着するため、全反射率で 10% すぐれている。また鏡面性が高く、 20° 光沢度で 60% すぐれている。
- (2) 下地層の平滑作用により、表面の最大粗さは $0.02 \mu\text{m}$ で、これはアルマイト反射鏡に比べて $1/5$ である。
- (3) 石英ガラス膜により、耐酸性、耐アルカリ性などが一段と向上した。
- (4) 高い平滑性と石英ガラス膜のため、ほこりが付着しても簡単に清掃できる。
- (5) このすぐれた反射鏡の一つの応用として、1,000 W HID ランプ用投光器を設計、開発した。新しい投光器はビーム効率向上のために、主反射鏡の一部に 24 個の突出傾斜面を設け、透明形または拡散形ランプの使いわけにより、それぞれ狭角形、中角形

広角形配光が得られる。

謝 辞

本研究において、種々ご助言いただいた東芝電材㈱研究所長野村脩氏、同施設照明器具事業部技術部長市川敦雄氏、横浜機工㈱取締役今井宏氏ほか関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 松下ほか：昭53電気関係学会関西支部連合大会講演論文集 S 7—2
- (2) 松下ほか：照学誌 63 (昭54) 194
- (3) GE : Technical Date, A New Reflector Finish "ALGL-AS"(1969)
- (4) 村木：昭51照明学会全国大会講演論文集 No.36
- (5) J. Reitmaier, et al: Siemens Review XLV (1978) 419

- (6) J. R. Brass, et at: IES Conference paper No.325(1979)
- (7) 金属表面技術協会編：金属表面技術便覧 (昭51) 602
- (8) 元橋ほか：昭55照明学会全国大会講演論文集 No.53
- (9) たとえば
伊藤ほか：金属材料 13 (昭47) 10
アイオニクス：IONICS 2 (昭51) 25
アイオニクス：IONICS 4 (昭53) 1
直江ほか：金属表面技術協会誌 30 (昭54) 216
- (10) 松下ほか：昭55照明学会全国大会講演論文集 No.54
- (11) S. Takahashi, et at: Prospectures of papers for CIE 1979 session 98, (Kyoto 1979)
- (12) 松下ほか：昭55照明学会全国大会講演論文集 No.52

(受付1980年7月1日)

11月号掲載予定目次

「乗り物照明」特集号

- 資 料 ○CIE TC-4.7 自動車照明技術委員会活動について
- 自動車用ランプ類の動向
 - 自動車用ヘッドランプの視認性
 - 自動車用テールランプの視認性
 - 道路照明と自動車前照灯
 - 鉄道車両照明のあゆみ
 - 東北上越新幹線の車内照明について
 - 東北上越新幹線車両の標識灯、表示灯などについて
 - 船舶における照明について
 - 航空機照明について

その他