耐熱プラスチックフィルムを応用した ダイクロイックミラーの開発

正会員 丸山 辰雄* 正会員 佐藤 光治*

Development of dichroic reflector based on plastic films

Tatuo Maruyama (Member), Koji Sato (Member)

(Lamp & Lighting Laboratory, Toshiba Lighting & Techonlogy Corporation)

Abstract

This paper describes the development of new dichroic reflector using the substrate of plastic film. The conventional substrate of dichroic reflectors for spot-lights is made of glass or aluminum, and recently the plastic substrate by injection molding is available.

So, at first, concerning characteristic as to reflector, three kinds of substrate, glass, aluminum, and plastic are compared with. As the result of comparison, we consider plastic films are applied to substrates of dichroic reflector. Examining heat resistance, stability, and optical characteristics of new dichroic reflectors using plastic films, sufficient results for reflector of spot-light are obtained. Especially, deposited protective coating on reflecting surface, higher stability is obtained. So, the spot-light using asymmetric reflector made of plastic film with 12 V 50 W halogen-lamp has been developed.

1. はじめに

比較的高照度を与える照明器具の反射鏡として、放射による被照射物の熱的損傷を減少させるため、光学多層膜の干渉作用を応用した赤外放射を透過または吸収し可視放射を反射するダイクロイックミラー（以下DMと記す）が用いられている。近年ではハロゲン電球の普及にともなって、店舗の重点照明（スポットライト）などの屋内照明器具にも数多く使用されるようになってきた。この重点照明に用いられることにより、DMは、いままでの熱的損傷を減少させるという機能だけでなく、その特徴を十分に発揮して新しい照明演出・器具デザインを創り出すことを可能にしている。

照明演出上では、“明るさ”“暗さ”だけでなく、被照射物の“色”を制御し、被照射物をより強調するDM付き電球¹⁾²⁾や反射鏡³⁾が開発された。また、器具デザイン上ではDM自身を直接見えるようにし、反射鏡を透過した光を外観デザインとして積極的に取り入れたスケルトンタイプのスポットライトも開発された。

一方、DMの基板となる材料面では、ガラス、アルミニウム、プラスチックが知られている。古くからDMの基板にはガラスが用いられ、現在においても耐熱性、表面処理が良好であることからもっとも多く採用されている。1989年には、よりDMの用

途や使用場所を拡大できるよう、ガラス基板の破損時の危険性を解消し、かつ大型化しても軽量で経済性のよい反射鏡としてアルミニウム基板を用いたDMが開発されている⁴⁾。さらに最近では、プラスチック射出成形による反射鏡がデザイン性のあるスポットライトに用いられている⁵⁾。

筆者は、DMを用いた照明器具の外観デザイン、照射パターンをさらに多様化するため、形状の自由度が高く多品種少量生産に対応できるDMの製作を目的に基板材料から検討を行った。その結果、反射鏡形状に成形したプラスチックフィルム表面に真空蒸着にて光学薄膜をコーティングしDMを製作し、実用可能な性能を得ると共に、プラスチックフィルム基板DMの特徴を生かした照明器具を開発したので報告する。

表1 現在使用されているダイクロイックミラーの比較

	ガラス	金属	プラスチック(現行)
代表的材料	ホウケイ酸ガラス	アルミニウム	ポリエーテルイミド
成形法	プレス	スピニング	射出成形
上限連続使用温度	250℃以上	約250℃	約160℃
許容最大寸法	φ250	φ500	φ200
基板肉厚*1)	3～5mm	0.8～1.2mm	2～3mm
重量*1)	260g	100g	120g
形状の自由度	良好	回転体に限る	優秀

*1) 開口径φ150mm、深さ50mm程度の反射鏡の場合

* 東芝ライテックス株式会社研究所
〒237 横浜須賀野町1 201-1

**本論文の一部を、1990年照明学会全国大会にて発表した。

図 1 現行ダイクロイックミラーの構成

2. ダイクロイックミラー (DM) の現状

表 1 に、現在使用されている DM の比較を示す。表 1 に示した 3 種類 (ガラス、金属、プラスチック) の DM は基板材料と基板の成形方法の点で異なっており、そのために耐熱性、重量、形状の自由度に差異がある。また、図 1 に現行の DM の構成を示す。アルミを基板とした場合には他の 2 つと比べ少し異なり、材料の赤外域の反射率が高いため図 1 (b) に示すように多層膜と基板表面の中間に吸光層が設けられている。

耐熱性は材料自身に依存する耐熱温度と高温使用による多層膜の耐久性に関係するが、どちらにおいてもガラス基板が最も優れている。しかし、アルミ基板もこれに準ずるものであり、今後の開発によりさらに耐熱性は向上するものと思われる。反射鏡の最大許容寸法は表面処理工程にほぼ依存するが、ガラス基板については反射鏡の大型化にともなう重量増大と表面処理装置への基板取付方法の制約から、成形できる寸法に限界がある。射出成形を用いたプラスチック成形品については大型用の成形機が必要であること、金型投資が増大することから、実用上寸法が制限される。耐熱性及び許容寸法の観点からはガラスかアルミを用いることが有効であると言える。

しかしながら本報の開発の狙いは、ガラス基板と同等な外観デザイン性を持たせながら、さらに形状の自由度を向上させ、様々

な器具デザインや配光が得られる DM を製作することである。ガラス基板の場合は、比較的いろいろな形状が可能ではあるが成形用金型が高価であり、現在のところ必ずしも形状の自由度を向上させる上で適した基板とはいえない。アルミ基板の場合はスピニング成形を用いれば比較的安価に基板を製作できるが、形状が回転体に限られ、さらにアルミ基板では材料の透光性を生かした器具デザインができない。また、射出成形によるプラスチック基板の最大の難点は成形品の肉厚が 2~3 mm 必要であるため、材料費が増大することと、熱容量が増し高温化に対応できないことである。

そこで、プラスチック基板の肉厚をできるだけ薄くすることができれば、材料費を低減させるとともに、熱容量を下げることで、射出成形によるプラスチック基板に比べ基板温度の低温化が期待できる。基板薄肉化のためにプラスチックフィルムを DM の基板に応用することを考え種々の実験的研究の結果、実用的な反射鏡の開発を行った。

3. フィルム基板を用いた DM の開発

3.1 開発目標

上述したように、プラスチックフィルム基板を用いた DM の開発としては様々な形状を容易に製作できるようにすることが最大の目標であるが、現行の射出成形によるプラスチック基板の欠

表 2 プラスチックフィルムの比較項目

- 点である耐熱性の改良も含め以下のような開発目標を定めた。
- (1) 反射鏡形状を様々な形状に作製できるようにする。
 <角型や楕円型などの回転体形状以外の実現>
 - (2) プラスチックの材料費をフィルムを用いることで低減し、より耐熱温度の高いプラスチック材料の利用を可能とする。
 <200℃前後の耐熱性と耐久性>
 - (3) 比重の小さいプラスチック材料の特長を生かした超軽量な反射鏡を実現する。

3.2 プラスチックフィルムの選択

表2にプラスチックフィルムを選択する上での調査比較項目を示す。このうち特に重要な項目は、耐熱性、赤外透明性、表面光沢度である。

耐熱性、赤外透明性は、よりDMを光源に近づけて使用することを可能とするものであり、特に赤外透明性が高いほど光源からの赤外放射の自己吸収によるDM基板の温度上昇を防ぐことができる。この観点からもフィルムを採用することは、熱容量を小さくすることだけでなく赤外透明性を向上させることにつながる。また、高い表面光沢度は正反射率を高め集光性の良い反射鏡を可能とする。フィルム材の供給時に光沢度が小さければ最終的に反射鏡としての鏡面性が期待できない。これらを満足するプラ

図2 PES、PIの分光透過率

図3 TMAによる収縮性の試験結果

スチックフィルムとして、ポリエーテルサルフォン（以下、PESと記す）、ポリイミド（以下、PIと記す）を選択した。

PES及びPIフィルムは、何種類かの厚さのものが供給されているが、今回は、できるだけDM基板の剛性を高めるため、供給されることが出来る最大の厚さである、厚さ300μmのPESフィルムと厚さ125μmのPIフィルムを選定した。図2にそれぞれのフィルムの分光透過率を示す。PES、PIとも赤外域の約2000nmまで85%の透過率を持つ。さらに、PESは可視域の透明性も高くガラス基板に類似した装飾性も期待できる。

表面光沢性については、成形前後の状態を3.3.3で述べる。

3.3 プラスチックフィルム基板製DMの性能

プラスチック基板製DMの基本特性を確認するために、厚さ300μmのPESフィルムと厚さ125μmのPIフィルムを開口径φ150mmの回転放物面形状に成形した。成形した基板の重量は、PESフィルムでは9g、PIフィルムでは4gであった。

基板にプラスチックフィルムを用いたDMの性能として、ここでは、高温時の寸法安定性、コーティングした光学薄膜の信頼性（密着性）、反射面の鏡面性の3点について報告する。

3.3.1 熱的寸法安定性

成形品の高温時の寸法安定性をTMA（Thermal Mechanical Analysis）にて測定した。測定に用いた成形品の形状は、開口径φ150mm、深さ60mmの回転放物面で、絞り比（深さ／開口径）0.4である。絞り方向に20mm、幅4mmに成形品の中央部を切断しサンプルとした。PES及びPIフィルムのサンプルを昇温係数5℃/1分で温度上昇させ、室温時の形状に対しての収縮率変化を測定した。結果を図3に示す。成形による内部応力のため、PESフィルムの場合は200℃、PIフィルムの場合は250℃を境に急激な収縮を示し、形状に大きな変化をもたらす。これらの結果はフィルム材料のガラス転移点温度と類似し、ガラス転移点寸法安定性を決める代表的な値であることがわかる。

また、同様の成形品を3時間オープン中に高温で放置し、その深さ方向の寸法変化を調べた。初期深さ寸法に対して、加熱処理後の深さ寸法の変化率を寸法保持率として表3に示す。TMAの試験結果を反映し、PESフィルム成形品は180℃、PIフィルムは240℃まで寸法保持率は100%であった。

ここで確認した収縮率変化と寸法保持率は、反射鏡の最大使用温度に関係するだけでなく、光学薄膜をコーティングする上でも重要な要因となる。

3.3.2 光学多層膜の信頼性（密着性）

真空蒸着により、制御波長（λ）を3種用い、各層の膜厚を

表3 オープン加熱による収縮性の試験結果
 （高温下3時間後の寸法保持率）

温度（℃）	寸法保持率 （h/h ₀ ）×100	
	PES	PI
160	100%	—
180	100%	—
200	98%*1	—
220	—	100%
240	—	100%
260	—	96%*2

*1 外観形状変形なし h：試験後の高さ
 *2 開口部変形 h₀：試験前の高さ

表4 プラスチックフィルム基板 DM の信頼性試験

試験項目	内 容	結 果	参考規格
付着力試験	10×10/1cm ² の格子状にカッターで傷をつけ、コート面にテープをつよくおしつける。サンプルのエッジからゆっくりテープをはがし、外観検査 ¹⁾ を行う。	異常なし	MIL-M-13508 C
温度試験	高温中に100時間放置し、その後付着力試験を実施する。(PES 180℃, PI 240℃)	異常なし	
ヒートショック試験	ヒートショックに適合する装置(急激な温度変化が可能なもの)にて-20℃30分, 180℃(PES), 240℃(PI)30分を300サイクル実施する。	異常なし	
温湿度試験	95%以上の相対湿度で温度40℃に保たれた試験槽にサンプルを300時間放置し、その後付着力試験を実施する。	異常なし	MIL-M-13508 C MIL-C-675 A
曲げ試験	曲げ半径1cmにて外曲げ, 内曲げを行い外観検査を行う。	異常なし	
溶解性試験	45g/lの食塩水に室温にて24時間浸し、その後柔らかい布で食塩水を拭き取り付着力試験及び外観検査を行う。	異常なし	MIL-C-675 A

¹⁾ 外観検査: 目視できるクラックや白濁などの表面の異常がないかを確認する。

$\lambda/4$ とした合計23層の光学多層膜を成形品表面にコーティングした。使用したコーティング材は二酸化チタン(TiO₂)と二酸化ケイ素(SiO₂)である。また、一般に低温での蒸着は、膜が緻密化されず附着力が低下し、水分の脱吸着の影響が大きくなるので⁶⁾、ここでは成形品が蒸着時に基板変形を伴わない程度にできるだけ基板加熱を実施した。図4に製作したPES基板DMの分光反射率を示す。

光学多層膜の信頼性として、特に膜と基板の密着性の観点から評価を行った。表4には、前章と同様のPESフィルム成形品及びPIフィルム成形品に多層コーティングし、約5cmに切断したサンプルの信頼性試験結果を示す。信頼性試験として米国MIL規格が比較的短期間で評価できる試験評価方法であり一般によく用いられるが、照明用DMは光源点灯時、高温状態となり室温との温度差が大きい環境で使用されることを考慮し、MIL規格を参考とした試験の他に試験項目をさらに追加した。PES、PIフィルムのDMは共にいずれの試験項目に対しても異常は認められなかった。これらの試験結果により、フィルム基板DMは照明用反射鏡として十分な信頼性があるものと判断される。

一般に、プラスチック基板はガラスや金属基板に比べて耐熱温度が低い。今回、開発したDMもより高出力の光源と組み合わせた場合、特にPESフィルムについては信頼性を高めることが望ましい。

そこで、より高出力の光源と組み合わせられた場合の信頼性を向上させる方法としてプライマーコートかトップコートを施すことが考えられるため、光学多層膜が蒸着されたPESフィルム基板DMにゾルゲル法により厚さ1.2μmのSiO₂のトップコートを施し、約5cm角に切断したサンプルを準備し上述のサンプルに追加した。試験評価方法としては、500Wハロゲン電球を用いた開口径200mmのスポットライトを上向き点灯し、その前面に3種類のサンプルを設置して光照射による促進試験を行った。そして、引っかき法⁷⁾を用いて照射時間経過ともなう膜剥離強度を測定した。温度分布の影響を小さくするために50時間毎にサン

図4 PES基板ダイクロックミラーの分光反射率

プルを回転させた。尚、サンプルの置かれた3カ所の表面温度は180~190℃であり、PES基板に対しては、形状を保持できる最大の温度である。

図5には、剥離強度測定の一例を示す。横軸は引っかき時間を示すが、時間に比例して引っかき針に力が加えられるため膜面に与えられた荷重を意味することになる。縦軸は針の受けた電位信号(任意値)を表示している。信号は針にかかる荷重の増加とともに変化し、膜が剥離すると信号は大きく乱れ、大きな出力が得られるようになる。図中に示した写真の黒くなっている部分が膜が剥離している所で、この部分で大きな信号の出力が得られた。従って、破線間の荷重が膜を剥離させるのに要した力であり、この力を剥離強度とした。測定に用いた条件は、針送りスピード10μm/min、荷重比31mN/minである。

図6にPES基板DMにトップコートを施していないものと施したものについて照射時間毎の剥離強度の変動を示す。測定はそれぞれ3回行い、図中には平均値を示した。また、トップコートの有無によって剥離強度が若干異なるため縦軸は相対値で示し

図 5 PES 基板上の光学薄膜の引っかかり試験結果

図 6 促進試験による多層膜の剝離強度の変動
試験条件：試験光源 500 W ハロゲン電球
被照射面温度 180~190℃

た。トップコートを施さない PES 基板サンプルは、550 時間後においても表 4 に示した付着力試験や曲げ試験によるクラックや剝離が生じることはないが、300 時間を越えたあたりで剝離強度の低下を示した。それに対し、トップコートを施したものは、この試験時間内では初期状態を維持していることがわかる。明らかにトップコートは効果を示し信頼性を向上させているものと思われる。尚、ここでは示さなかったが PI フィルムの場合は、トップコートを施さなくてもこの試験に用いた温度下であれば PES フィルム基板 DM にトップコートを施したものと同様な試験結果が得られている。

3.3.3 光学的性能 (鏡面性)

成形された反射鏡の光学特性を支配するものとして表面のうねり (歪み) と光沢度 (鏡面性) があげられる。これらは、光の質 (ビームの鋭さ) や効率の低下となり現れる。

フィルム成形による反射鏡は、肉厚が薄いために所々に表面にうねりを持ち、ビームのパターンに影響を与える。しかし、一般照明では組み合わせる光源が均一の発光体であることは少なく、ほとんどの反射鏡がその表面にファセットやディンプル⁸⁾などの模様を施しビームパターンの均一化を図っている。開発したフィルム成形品を用いた反射鏡においても表面に模様を形成することにより、成形時のうねりの影響を無視し均一なビームパターンを得ることができる。

図 7 表面粗さ曲線

図 8 開発した照明器具の外観

(使用光源 12 V 50 W ハロゲン電球
 使用反射鏡 PES フィルム基板ダイクロイックミラー
 反射鏡寸法 135×115×40^h
 反射鏡表面ツチ目処理)

これに対し、光沢度が小さいと光を散乱させ、目標の方向へ光を反射できなくなると共に、照明率、ビーム効率の低下をもたらす。図 7 に PES フィルムの成形前と成形後の表面粗さ⁹⁾を示す。ここでは光沢度として表面粗さを代用した。成形による表面粗さの変化は非常に小さく、ガラスやアルミ基板と同等以上の光沢度を有している。これまでの反射鏡と比べ、成形用の型表面の仕上げ加工や成形品の表面を後工程で研磨などを必要とせず高い光沢が得られるのもプラスチックフィルム反射鏡の特徴のひとつである。

4. 照明器具への応用

開発した反射鏡は厚さ 100~300 μm と非常に薄いため、ほとんど重量感がなく、外形や反射面の形状の自由度が高いものである。基板材料として PI フィルムを用いれば耐熱温度が高いため今まで以上にプラスチックを基板とする反射鏡の小型化ができ、PES フィルムを用いればガラス基板と類似する光透過性を利用した外観デザインを実現することができる。これらの特長を生かし、“軽さ感”をコンセプトとして、非常に軽量化された PES フィルム基板の DM と 12 V 50 W ハロゲン電球の組み合わせ

図9 開発した器具の照度分布
(上から、照射面の写真、照度分布、照度変化率分布を示す。)

せた器具を開発した。

図8に今回開発したDMを用いた照明器具の一例を示す。反射鏡形状は、従来の回転放物面形状から楕円放物面を有する非対称形状を実現し、器具デザインに新規性をもたせ、さらに非対称な配光を得るようにした。

図9にこの照明器具1m下の反射鏡の開口面と水平な面の照度分布を示す。図は斜め方向から見たように変形させ、照射パターンがどの様なビームの輪郭や鋭さをもっているか分かりやすくするため、斜め方向からみた照射面の写真、照度分布、照度変化率分布¹⁰⁾を立体的に表現したものである。照度測定は、A-A、B-Bそれぞれの方向に5cm毎に行い、照度変化率分布は5cm単位区域内の照度変化の勾配の対数値を補間してメッシュ表示をしたものである。照度変化率分布の最も高い所がビームの輪郭を表している。

開発した照明器具は、プラスチックフィルムをDMの基板に応用することにより、ガラスや金属の基板と同様なDMの機能を持ち、光透過性と軽さを特長とした種々のデザインと非対称的な配光を可能にした。

5. ま と め

開発したプラスチックフィルムを用いたDMの仕様及び特長を以下にまとめる。

・仕様

- 1) 基板材料：PES及びPI
- 2) 上限使用温度：180℃(PESの場合)、240℃(PIの場合)
- 3) 許容最大寸法：開口径でφ200mm程度
(現在までに確認された成形可能な寸法)

- 4) 基板肉厚：0.1mm～0.3mm

(ただし、PIフィルムの場合は0.125mm以下)

- 5) 重量：開口径φ150mm、深さ50mmの場合、4～9g
(ガラスに対し約1.4%、アルミに対し約4%の重量費)

・特長

- 1) いろいろな形状の反射鏡が比較的簡単に作ることができる。
- 2) 超軽量な反射鏡を実現でき器具軽量化とともに斬新な照明器具、照明手法が期待できる。

6. お わ り に

本稿では、プラスチックフィルム基板ダイクロイックミラーの実用性を確認すると共に、これを応用した器具の開発を行った。これにより、ダイクロイックミラーの基板としてガラス、金属、射出成形によるプラスチックに加えて、新たにプラスチックフィルムがダイクロイックミラーの基板として使用できるようになった。これら基板材料の多様化は、例えば、ガラス基板はより小型のDMとして、大型なものに対応しやすい金属基板は出力の高い投光器やスポットライト用のDMとして、形状に自由度があり軽量のプラスチックフィルム基板は、デザイン性が強くカスタムメイドな器具や軽さを生かした可動型の器具のDMとして、それぞれの特長を生かしながら、さらに様々な用途にダイクロイックミラーが使われることを可能にすると考えられる。

参 考 文 献

- (1) 大友、井上：ネオジウムタイプハロゲンランプ、照学全大(昭63)
- (2) 白鳥、福住：ダイクロイックミラー<ネオジウム色>ハロゲンランプの諸特性、照学全大(昭63)
- (3) 丸山、松下：ハロゲンランプ用高色温度変換反射鏡の開発、照学全大(平01)
- (4) 梶山、橋端、高橋：金属基委ダイクロイックミラーの薄膜設計シミュレーションの開発とその応用、照学誌73-10(平01)
- (5) PROGRESS REPORT 1990, *Light. Des. Appl.* 20-11(1990) p5
- (6) Macleod, H. A.: THIN-FILM OPTICAL FILTERS, Adam Hiiger (1986)
- (7) Baba, S., Kikuchi, A. and Kinbara, A.: *J. Vac. Sci. Technol.*, A4 (1986) 3015; *J. Vac. Sci. Technol.*, A5 (1987) 1860
- (8) 山中、真辺、村上：ミニハロゲン電球用反射板設計について、照学全大(平01)
- (9) 松下、高橋、梶山、瀬名波：蒸着反射鏡を用いた高効率投光器の開発、照学誌64-10(昭55)
- (10) Kemenade, J. T. C. and Reker, J.: Beam Characteristics for Accent Lighting, *Illum. Eng'ng. Soc.* 17-2 (1988) 118-130

(受付1991年4月10日)