

薄型リアプロジェクターの光学系

桑田 宗晴・笹川 智広

Optical System for Thin Rear Projectors

Muneharu KUWATA and Tomohiro SASAGAWA

Minimization of the depth of rear projector units can be said an essential technological problem today, and rear projectors are in very rapid progress toward a thinner profile, accelerated by the new projection optics of unheard-of wide angles, developed in the recent year. This paper describes the latest technological trend, focusing on the structure and features of the wide-angle projection optical system used in such super-thin rear projectors.

Key words: microdisplay, optical system, rear projector, wide angle

リアプロジェクター（リアプロ）は、小型の画像表示素子を光学系で拡大して透過型スクリーンに背面から投写する構成となっている。それゆえ、大画面を低コストで容易に実現できるというメリットをもつ反面、投写光路を確保するためのスペースが必要となることから、奥行きが大きくなってしまふというデメリットももっている。リアプロの代表的な市場であるテレビにおいて、従来、直視のCRT（cathode ray tube）がカバーできない大画面テレビはリアプロの独壇場であったために、奥行きが大きいことに対する問題は特になかった。しかし近年、PDP（plasma display panel）やLCD（liquid crystal display）に代表される薄型のフラットテレビの大画面・低価格化が進み、大画面市場におけるリアプロとの競合が激しさを増しているため、リアプロにおいても薄型化を図ることが現在必須の課題となっている。

初期のリアプロは、画像表示素子として対角10インチ以下程度のCRTをRGB用に3管用い、それらをスクリーンに対して横並びに投写するCRT方式を採用していた。この方式では、スクリーンに対するRGB各ブラウン管の投写光軸の傾きの差から生じる色ずれを小さくするために、投写距離をある程度大きくする必要があり、またブラウン管自体が占める体積も比較的大きかったことから、

奥行きのみならず画面下の袴部も大きくなってしまい全体が特に大型であった。しかし現在では、CRTに替わり、DMD（digital micro mirror device：米国テキサス・インスツルメンツ社製の反射型素子）やLCD、LCOS（liquid crystal on silicon）といった対角寸法1～0.5インチ程度の小型画像表示素子を用いたMD（micro display）方式が主流となり、投写距離の短い広角投写光学系の採用とも相まってリアプロの薄型化が進展してきた。そして、ここ数年の間に、MD方式においてさらに広角の投写光学系がいくつか開発され、大幅な薄型化が可能となった。本稿では、その超薄型MD方式のリアプロジェクション光学系の構成や特徴等、最近の技術動向について解説する。

1. リアプロの奥行き

図1に、リアプロとPDP・LCDテレビにおける、画面サイズと奥行きとの関係を示す¹⁾。リアプロおよび設置のためのスタンドを含めたPDP・LCDでは、画面サイズの増大に伴い奥行きが大きくなる傾向にあるが、リアプロのほうがその割合が大きい。また、スタンドを含めないパネル部のみのPDP・LCDの奥行きは、画面サイズによらず5インチ程度で一定している。リアプロの各方式に関して画面サイズ60インチ程度で比較すると、従来のCRT方

三菱電機株式会社先端技術総合研究所（〒617-8550 長岡京市馬場園所1番地） E-mail: Kuwata.Muneharu@cs.MitsubishiElectric.co.jp

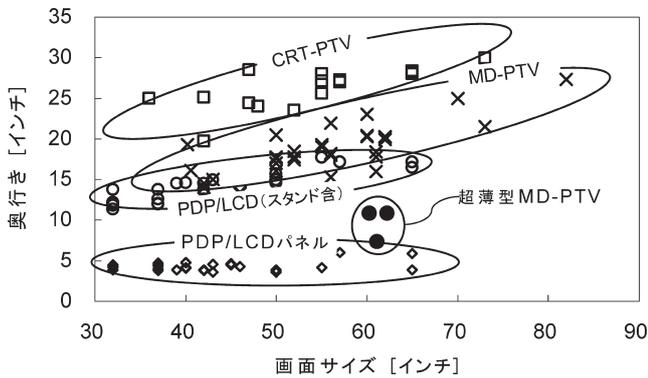


図1 各種ディスプレイの画面サイズと奥行きとの関係。

式から通常の MD 方式への進化により奥行きは約 3 分の 2 程度に、また超薄型 MD 方式への進化によりさらに約 2 分の 1 程度にまで短縮されている。同じく画面サイズ 60 インチ程度において、PDP・LCD と比較すると、通常の MD 方式の中にはスタンドを含めた PDP・LCD とほぼ同等の奥行きを実現するものがあり、また超薄型 MD 方式では、PDP・LCD のパネル部の奥行きに迫るほど薄型化が進んでいる。

2. リアプロの薄型化

MD 方式のリアプロにおける薄型化の手段と課題について述べる。図 2 (a) に示すように、通常の投写光学系では、光軸がスクリーンに対して垂直となるように画像を投写し、画面の背面に光軸に対して斜めに平面ミラーを配置して光路を折り返している。このような垂直投写の構成で奥行きを短縮する場合、図 2 (b) のように背面ミラーをスクリーンに対して平行に近づける方法と、図 2 (c) のように投写画角を広角化する方法とが考えられるが、どちらの場合も投写光と投写光学系との干渉が生じるため、十分な

薄型化を実現することができない。この問題を解決する手段として、図 3 に示すように画像表示素子を光軸からオフセットして配置し、スクリーンに対して画像を斜めに投写する構成が考えられる。これにより背面ミラーをスクリーンに対して平行に配置することができ、かつ投写光と投写光学系との干渉を回避できるため、大幅な薄型化が可能となる。しかし、このような斜め投写の場合には、垂直投写の場合と比べて投写画角が大きくなるため歪曲や倍率色収差が増大し、それらを補正することが課題となる。しかし、レンズのみで構成される通常の屈折型投写光学系における投写画角は最大で 90 度前後であり、それ以上画角が大きくなると、歪曲や倍率色収差を良好に補正することが困難になる。そこで、この課題を克服し、斜め投写で薄型化を実現する新たな構成の広角投写光学系が、近年いくつか開発されている。

3. 超薄型投写光学系

図 4 に、これまでに発表された代表的な超薄型 MD 方式用広角投写光学系の構成を示す。図 4 (a) は、4 枚の非球面ミラーで構成される投写画角 130 度の反射型光学系である²⁾。大きな非球面ミラーにより歪曲を補正し、またレンズを使用しないため、色収差は原理的に発生しないという特徴をもつが、投写光学系内部で光路が鉛直方向に複数回折り返されるため、袴部が大きくなってしまふ。実際には、フロントプロジェクターに適用されているが、リアプロにも応用が可能な光学系である。図 4 (b) は、大きく分けて 2 つのレンズ群で構成される、投写画角 153 度の屈折型光学系である³⁾。それぞれの群で反対符号の収差を発生させて打ち消すことにより、歪曲と倍率色収差は全体として小さく抑えられている。この構成では、投写光学系以降で平面ミラーにより光路を 2 度折り返しており、光路とレ

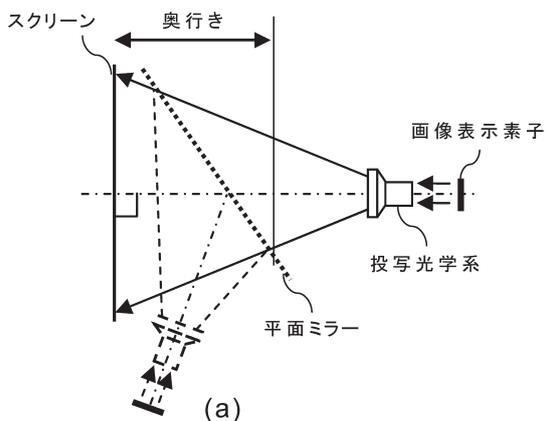


図2 従来型投写光学系のレイアウト。

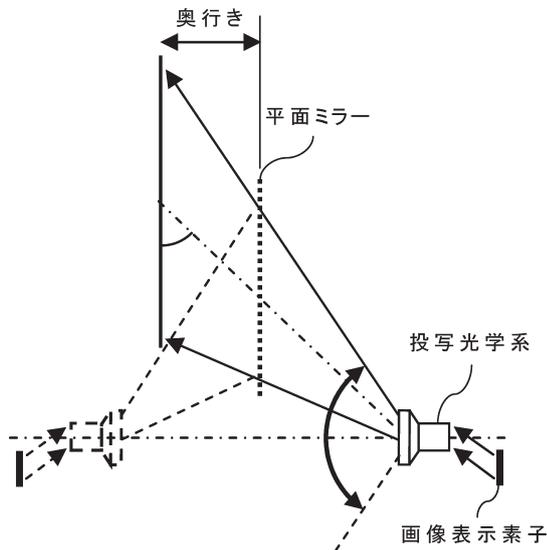


図3 斜め投写光学系のレイアウト。

レンズやミラーとの干渉を避けるために袴部が大きくなってしまふ。図4(c)は、三菱電機が開発した、レンズと非球面ミラーとで構成される投写画角136度の屈折・反射型光学系である⁴⁾。歪曲は大きな非球面ミラーにより補正される。また、非球面ミラーに大きなパワーをもたせて画角を大きく拡大しているため、レンズのパワーは弱くでき、倍率色収差も小さく抑えられる。この構成では、レンズと非球面ミラー間で光路を水平方向に折り曲げるため、袴部はそれほど大きくならない。図4(d)は、同じく三菱電機が開発した、160度の投写画角をもつ屈折・反射型光学系である⁵⁾。図4(c)からさらに画角を拡大することにより、薄型で袴部の小さいコンパクトなリアプロを実現した。以下に、この後者の屈折・反射型光学系の設計原理と、その試作機の実績を示す。

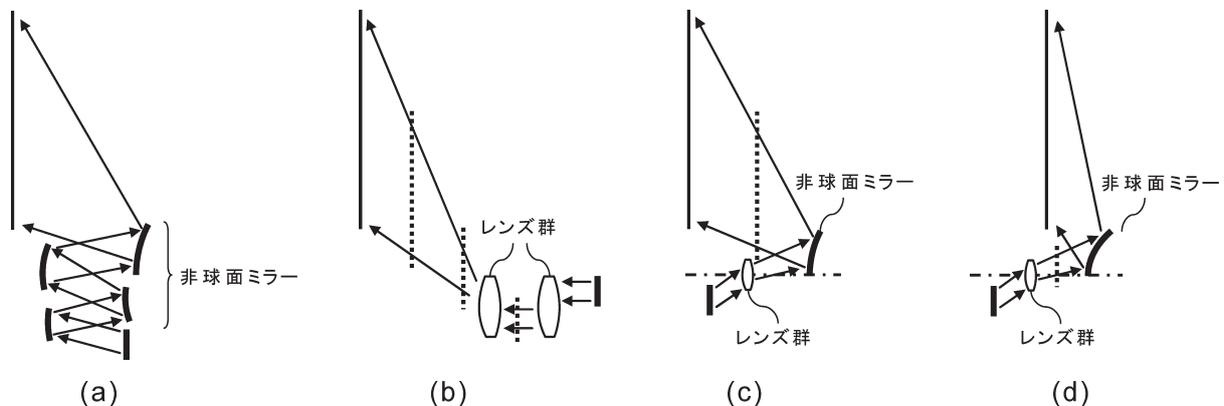


図4 超薄型投写光学系レイアウト。

4. 屈折・反射型光学系

前述したように、投写画角を拡大すると一般に歪曲と倍率色収差が増大するが、レンズと非球面ミラーとを組み合わせた構成とすることで、筆者らはこの問題を解決した。しかし、本光学系において投写画角のさらなる広角化を図るうえでは、像面湾曲の補正が新たな課題となった。像面湾曲とは、平面物体の結像面が平面とならずに湾曲する現象であり、それによりスクリーン面内でフォーカス性能が不均一になるため、ディスプレイの品位が損なわれてしまふ。三次収差の領域では、平面物体の結像面は球面となり、その球面の曲率が大きいと像面湾曲も大きいことになる。ペッツヴァルの定理によると、空気中における薄肉レンズ近似での像面の曲率は式(1)で示され、この量をペッツヴァル和という。

$$P = \sum_{i=1}^k \frac{\phi}{n_i} \quad (1)$$

ここで、 P はペッツヴァル和、 ϕ は薄肉レンズのパワー、 n_i は第 i 番目のレンズの屈折率、 k はレンズの総枚数である。像面を平面とするためには、ペッツヴァルの条件 $P=0$ を満たす必要がある。しかし、投写光学系は全体として正の焦点距離をもつために、 P は一般に正の値をとり、この条件を満たすことは困難である。よって、像面湾曲を小さくするためには、正レンズだけでなく負レンズも組合せた構成として、 P の負の成分を発生させて P の絶対値をできるだけ小さくする必要があるが、それによりレンズの構成は複雑になってしまう。そして、投写画角が大きくなるほど像面湾曲の影響を大きく受けることから、この傾向は顕著になる。通常の光学系は、この理論に基づき設計されるため、広角になるほど像面湾曲を補正するためのレンズ構成が複雑になってしまう。しかし、このことは、ザイデル理論の範囲内でのみ当てはまり、その範囲外では意味をもたない⁶⁾。また、広角になるほど全画角範囲

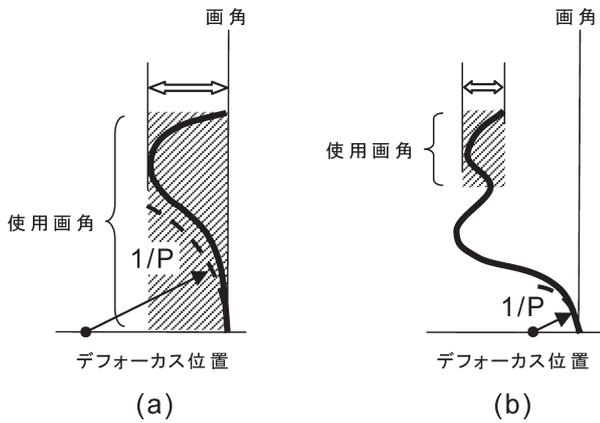


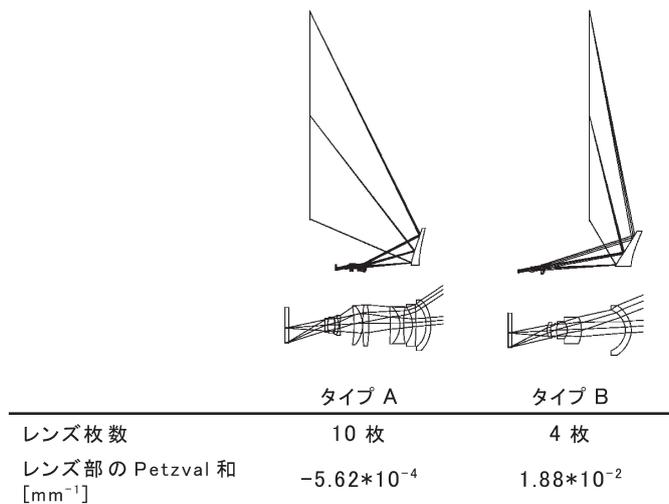
図5 像面湾曲の補正原理。

にわたって像面湾曲を補正することが困難になるため、画角範囲はできるだけ狭いほうが好ましい。図5 (a) に光軸上を使用する通常の投写光学系、図5 (b) に本光学系における、画角が広角な場合の像面湾曲補正の概念図をそれぞれ示す。図5 (a) では、光軸上を含む低画角から高画角までの広い画角範囲にわたって、像面湾曲を補正しなければならない。 P の絶対値をある程度小さくすることで、光軸付近の像面湾曲を少なくしながら高画角部の像面とのバランスはとれるものの、実用的なレンズ構成の範囲では全体としての像面湾曲量を小さくするのは困難となる。それに対し図5 (b) における像面湾曲は、光軸付近では非常に大きいものの、実際に使用する、光軸から大きく離れた狭い画角範囲内では高次の像面湾曲とのバランスをとることにより小さく抑えられている。このような設計原理を適用

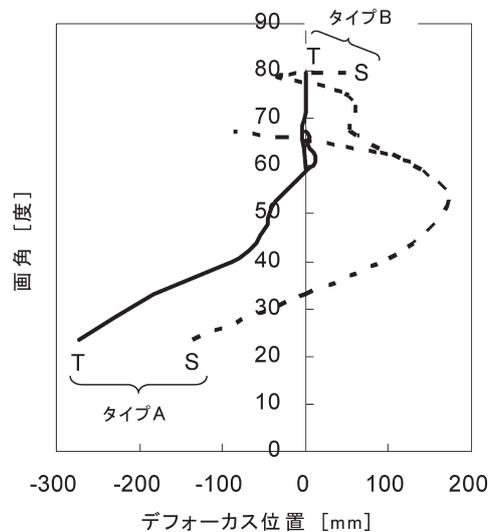
すれば、超広角な投写光学系であっても、ペッツヴァルの条件を満たさない簡単なレンズ構成を採用できる。このことを検証するために、図6 (a) に、同じ屈折反射型の斜め投写光学系である図4 (c) および本光学系の画角仕様に基づいた設計例のレイアウトならびにそれらのレンズ構成とレンズ部の P 成分を、図6 (b) にそれらの像面湾曲を示す。これらのようなレンズと凸面ミラーとで構成される光学系の場合、 P はレンズ部の P 成分とミラー部の P 成分との和になる。また、凸面ミラーは正の P 成分を有し、かつ比較的曲率が大いいためにその絶対値も大きいことから、ペッツヴァルの条件を満たすためにはそれを相殺するだけの負の P 成分をレンズ部が有する必要がある。したがって、前者 (タイプ A) は比較的低下角を使用するため、レンズ部では10枚構成として負レンズを多く含むことにより負の P 成分を有するようになっている。それに対し、後者 (タイプ B) では、より高画角部の狭い領域を使用するために低下角の像面湾曲に影響されず、大きい P 成分をもつ4枚構成のレンズであっても使用画角範囲内で像面湾曲を十分に補正できていることがわかる。

図7にこのような設計原理に基づいて試作した光学エンジンを、表1にその仕様を示す。光学エンジンはおもに光源・照明光学系・画像表示素子・投写光学系から構成されるが、さらに平面ミラーを用いてレンズ群と非球面ミラー間の光路を折り曲げることにより、全体を1枚のベースにコンパクトに配置している。

非球面ミラーのサイズが大きいほど歪曲の補正は容易となり、その分他の収差補正にも設計の自由度を割り当てら



(a)



(b)

図6 設計例のレイアウトと像面湾曲。

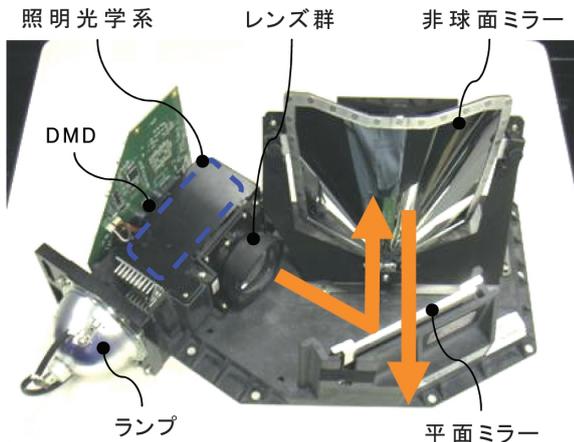


図7 試作光学エンジン.

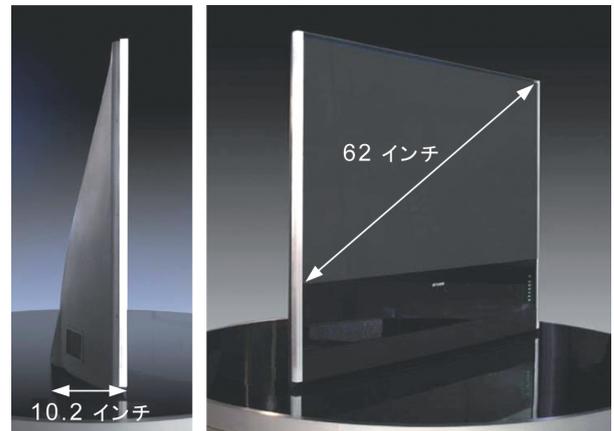


図8 試作リアプロジェクションTV.

表1 試作光学エンジンの仕様.

画面サイズ	62インチ
投写画角	160度
投写距離	非球面ミラー頂点から125mm
F 値	3.5
レンズ構成	8群10枚
非球面ミラーサイズ	165×102mm (有効領域)
歪曲	0.3 TV% 以下
画像表示素子	DMD (0.79インチ)
解像度	1280×720

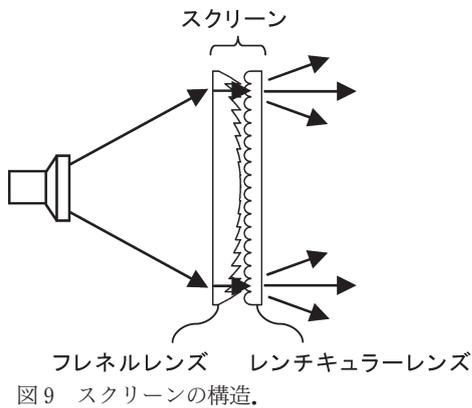
れるため、結像性能・歪曲性能・ F 値といった投写光学系の性能を総合的に向上でき、レンズ構造の簡素化も可能となる。しかし一方で、ミラーのコストや製造性を考慮すると、そのサイズは小さいほうが望ましい。これらを勘案して、非球面ミラーサイズやレンズ構成、 F 値を最適化した。

前述のとおり、広角な光学系において非球面ミラーが大きな歪曲補正能力を有するという事は、いいかえれば非球面ミラーが歪曲に対する感度が高く、ミラー表面に形状誤差があると、歪曲に大きな影響を与えてしまうことを意味する。特に、本光学系のように投写画角がきわめて広角な場合には、その影響もさらに大きくなるため、ミラーの形状誤差をできる限り小さくすることが非常に重要となる。また、大型の非球面ミラーを速く大量に製作するには樹脂の成型による方法が適しているが、樹脂はガラスよりも膨張係数や吸湿性が大きく、温度や湿度等の環境変化によるミラー表面形状の変形も成型時の形状誤差と同様に重要となる。ミラーが等方膨張・収縮する場合には、投写画像はほぼ相似形を保って拡大・縮小されるためそれほど問題とならないが、膨張・収縮時にミラーの一部が拘束されて局所的な変形が生じると、それに対応する投写画像の一部分のみが大きく歪むことになり、この現象は許容しがた

い。前者の形状誤差に関しては、超精密成型技術を適応して形状誤差を PV (peak to valley) $40\mu\text{m}$ 以下に抑えることにより、投写画像の歪曲を $0.3\text{ TV}\%$ 以下と十分小さく抑えることができた。後者の外部環境に起因する形状変化に関しては、吸湿性の少ない樹脂材料を選択したうえで、ミラーに対して外部から極力負荷をかけず等方膨張・収縮させることが可能な独自のミラー保持機構を開発することにより、使用温度・湿度範囲内において歪曲の変動量を有効に抑えることができた。

図8に、この光学エンジンを搭載したリアプロジェクションTVを示す。投写画角を拡大することにより、投写距離を大幅に短縮したので、背面ミラーを配置して光路を折り返すことなく、光学エンジンからスクリーンに直接投写する構成となっている。そのため、大型の背面ミラーを保持する機構が必要なく、また背面ミラーの傾きにより画像の歪みが生じることもないので、光学エンジンとスクリーンとの位置関係さえ規定できればよい、軽量で簡単な筐体構造とすることができる。投写画面サイズ62インチに対し製品奥行きは10.2インチであるが、筐体の上部ほど薄いスリムで斬新なデザインを採用できるので、数字上の奥行きよりも薄型感がいっそう強調されている。

また、画像を表示する透過型スクリーンも、リアプロの性能を左右する重要な要素のひとつである。図9に示すように、スクリーンは光学エンジンから広がって射出される投写光をおおむねテラセントリックとするフレネルレンズと、視野角を拡大するレンチキュラーレンズとからおもに構成されるが、投写画角との関係においてはフレネルレンズの透過率がより重要となる。フレネルレンズには屈折型と全反射型があり、図10に画角とそれらの透過率との関係の一例を示す。通常の投写光学系で用いられる屈折型では、画角の増大とともに反射ロスにより透過率が減少して



画面の周辺輝度が低下するため、高画角での使用には適さない。一方、全反射型はある一定の画角以上では透過率が高く、しかも画角によらず一定している。高画角部のみを使用する本光学系では、この全反射型を採用することにより80%以上の高い輝度均一性を実現した。

LCDやPDP等の薄型フラットテレビの大画面・低コスト化が進み、大画面テレビ市場におけるリアプロとの競争が激しさを増している状況の中では、これまで奥行きが大きかったリアプロにおいても薄型化を図ることが現在必須の課題であるといえる。その薄型化を可能とする広角投影光学系として、屈折型と反射型、屈折・反射型の3つの新たな構成を有するものが提案されているが、その中でも屈折・反射型の光学系は薄型かつ袴部のより小さいコンパクトなリアプロが実現できる。近年、画質等の性能面におけるリアプロの進展は目覚ましいが、それらに加えて薄型のデザインという新たな付加価値を生み出すことで、他方式のフラットテレビとの差別化ならびに他のリアプロとの差

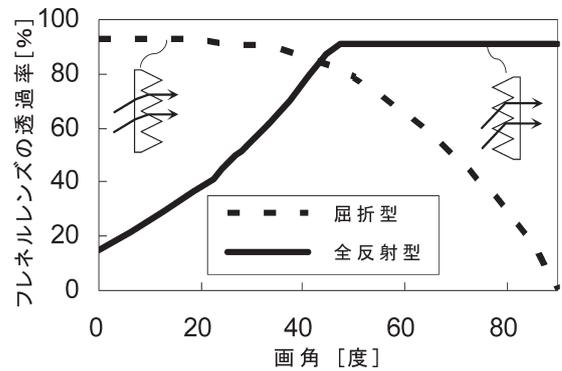


図10 画角と屈折型・全反射型フレネルレンズの透過率。

別化を図ることができるものと思われる。

文 献

- 1) M. Kuwata, T. Sasagawa, K. Kojima, J. Aizawa, A. Miyata and S. Shikama: "Wide-angle projection optics for thin rear projectors," *IDW/AD Symposium Digest*, LAD2-1 (2005) pp. 1887-1890.
- 2) J. Ogawa, K. Agata, M. Sakamoto, K. Urano and T. Matsumoto: "Super-short focus front projector with aspheric mirror projection optical system," *SID Symposium Digest*, 12.3 (2004) pp. 170-173.
- 3) J. Gohman, M. Peterson and S. Engle: "Slim rear projection," *SID Symposium Digest*, 70.4 (2005) pp. 1922-1925.
- 4) S. Shikama, H. Suzuki and K. Teramoto: "Optical system of ultra-thin rear projector equipped with refractive-reflective projection optics," *SID Symposium Digest*, 46.2 (2002) pp. 1250-1253.
- 5) M. Kuwata, T. Sasagawa, K. Kojima, J. Aizawa, A. Miyata, S. Shikama and H. Suzuki: "Wide-angle projection optics for a compact rear projector," *SID Symposium Digest*, 70.3 (2005) pp. 1918-1921.
- 6) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 5th ed. (Pergamon Press, New York, 1975) p. 226.

(2006年1月21日受理)