

# 反射型投写光学系を用いた 超短焦点フロントプロジェクタ

安形 一宏・小川 潤・古市 邦高  
福永 博昭・武内 直

## 要 旨

情報を拡大投写するフロントプロジェクタは、高輝度・高解像度化が進み、小型で設置性に優れたプレゼンテーションツールとして、市場拡大を遂げてきました。NECでは、さらなる性能向上をめざし、投写光学系に屈折型レンズを使用せず、反射型光学系（非球面ミラー）のみで構成したフロントプロジェクタを開発しました。本投写光学系は、4枚の非球面ミラーを搭載し、わずか0.65m という投写距離で100 インチの大画面を投写可能な超短焦点を実現しています。

## キーワード

● プロジェクタ ● 超短焦点 ● 非球面ミラーレンズ ● 反射型光学系

## 1. はじめに

近年、パソコンにより誰でもが簡単にきれいな資料作成やその資料を基にしたプレゼンテーションが可能となり、ビジネス用途でのプロジェクタ利用が定常化されてきました。一方、家庭においてもホームシアターなどとして同装置の普及が加速されつつあります。

本稿ではこのプロジェクタの技術革新の1つとして注目を集めている超短焦点投写技術について、世界に先駆けて発表した非球面ミラー超短焦点投写方式<sup>1,2)</sup>を採用したプロジェクタ「WT610」を例に紹介します（写真）。



写真 超短焦点ミラープロジェクタ「WT610」

## 2. ミラーによる反射型投写方式の必要性

プロジェクタの技術進歩には目覚ましいものがありますが、そのなかの重要な要求の1つとして投写距離の短縮が挙げられます。

図1はそのメリットの例です。

投写距離を極小化することのプロジェクタ装置側から見た開発課題は、超短焦点投写レンズの開発に他なりません。この数年、投写距離の短縮はさほど進んでいません。通常、投写レンズは硝子を磨いた凹凸の単レンズを10枚程度組み合わせ構成されます。何枚ものレンズで構成するのはレンズとしての諸性能(投写距離、各種収差などを所定のレベルに



図1 投写距離短縮の必要性

収める)を満足させるためですが、これらの性能はかなりの部分でトレードオフの関係にあります。したがって、投写距離を極端に短くすることは他の性能を急激に劣化させることとなり、その両立が進みませんでした。この解決方法の1つとして、近年反射方式のミラーを屈折型レンズと組み合わせた光学系が提案されています<sup>3)</sup>、飛躍的な投写距離の短縮やそれに伴う収差を補正するには、屈折型レンズを用いない完全な反射方式が必要となります。

### 3. 反射型投写方式の基本

ミラーを用いた反射型レンズ(以下、ミラーレンズ)に関しては、天体望遠鏡などの望遠鏡光学などで一般的に知られています<sup>4~6)</sup>。ミラーレンズは、基本的に屈折型の硝子レンズで発生する屈折率の波長依存性がないため、各種収差のなかで色収差が発生しないという特徴を持っています。ただし、反射方式であろうと屈折型レンズに使用する硝子材料の分散に起因する収差以外にもミラー表面形状などによる収差は発生します。したがって、ミラーレンズの設計では、これらの収差を実使用レベルまで極小とすることに留意する必要があります。

図2の(a)(b)(c)は、ミラー枚数が2枚、3枚、および4枚ミラーの場合のミラー構成Mn、各ミラーの焦点距離fn(曲率半径rn)、合成焦点距離Fn、およびそのときのペッツパール和pnを示しています。基本的にはペッツパール和はSM(Sagittal Meridional)両像面の非点収差の総計の意味で、この数値を最小にする設計を行うことはレンズ設計ではよく知られています<sup>7)</sup>。

超短焦点で実使用に耐えるレベルにペッツパール和を最小にし、かつミラーの数を実用レベルまでに抑える、つまりミラー表面での散乱に伴うコントラスト低下および反射率( $R=R1 \times R2 \times \dots$ )による明るさの低下を考慮して設計を行うためには、ミラーの表面形状を球面で設計することは困難で、これを可能にするためにミラー表面形状には非球面形状を導入しました。このときの非球面は一般的に次式で与えられます。

$$Z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}} + \sum_{i=1}^n \alpha_i h^{2i}$$

ここで、

$$c = 1/r \quad (r: \text{曲率半径})$$

$$h^2 = x^2 + y^2 \quad (x, y, \text{および } z \text{ はミラー頂点からの座標})$$

(a) Dual-Mirror System

$$\frac{1}{F_s} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - d_1 \frac{1}{f_1 f_2} \quad p_s \propto \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

(b) Triple-Mirror System

$$\frac{1}{F_s} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} - d_1 \frac{1}{f_1 f_2} - d_2 \frac{1}{f_2 f_3} \quad p_s \propto \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3}$$

(c) Quad-Mirror System

$$\frac{1}{F_s} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_4} - d_1 \frac{1}{f_1 f_2} - d_2 \frac{1}{f_2 f_3} - d_3 \frac{1}{f_3 f_4}$$

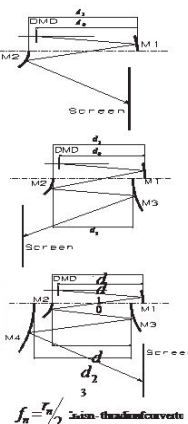


図2 ミラー構成例と各焦点距離・収差

以上の設計原理に基づいて所望のミラーレンズの仕様を満たすように収差補正をしながら、かつ量産性を考慮し、ミラー間隔、枚数、サイズ、および非球面定数 $\alpha$ の最適化を行いました。

### 4. 実際の製品における光学設計と構成

図3は「WT610」の光学構成の模式図です。表示デバイスには単板方式のDMD<sup>TM</sup>を使用しており、この方式ではカラーホイールと呼ばれる角度分割した赤、青、緑の3原色のカラーフィルタ、均一照明を行うロッドインテグレータおよびリレー

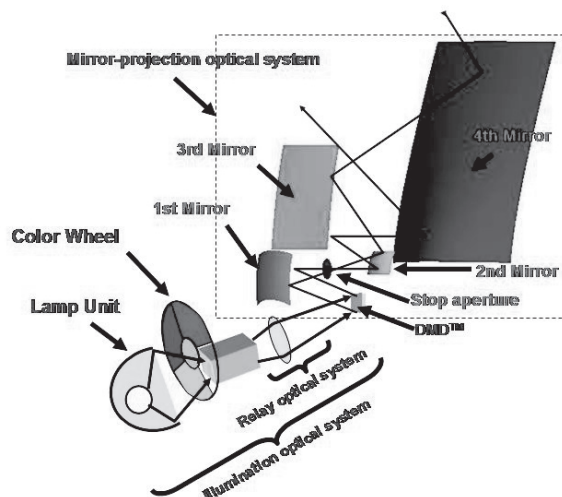


図3 光学構成模式図

## 反射型投写光学系を用いた超短焦点フロントプロジェクタ

光学系を通してDMD™を照明します。DMD™の各素子がオン時のみ反射された映像光が各ミラーに入射します。結像系は非球面ミラーの4枚構成で、それぞれの形状はM1:凹面、M2:凸面、M3:凹面、M4:凸面となっています。

表はミラーM1,M2,M3,M4の非球面設計値で、それぞれの曲率 $r$ と非球面定数 $a$ を示しています。本設計例では装置仕様を満たすために第16次の非球面項(ただし、偶数項のみ)まで計算しています。またコントラスト性能向上のため、M1とM2の間に絞りを挿入し、M1表面での不要散乱光やDMD™オフ時のオフ光がその他の部品で反射された不要光を遮蔽する構造をとっています。もちろん、この絞りの径は、照明系あるいは結像系のFナンバーによって決定されます。また、本ミラーレンズでは、光軸方向へのフォーカス調整用にM3を可動させる構造をとっています。このためM3の設計では、可動させることによる種々の性能への影響を極力避けるため、表に示すように曲率 $r=3,000\text{m}$ 以上と表面形状をほぼ平坦としました。

図4に「WT610」の光学エンジンの構成を示します。各ミラーの材料は設計仕様の満足、環境温度変化などへの影響および量産性を考慮して、M1とM2にはガラス材料を、M3、M4にはプラスチック材料を用いました。なお、このプラスチック材料には、高温環境下における反りや変形を防ぐため低吸水性の非晶質オレフィン系樹脂材料を採用しました。またミラー配置においては、各ミラーの光軸を合わせる必要があります。しかしながら本ミラーレンズは屈折型レンズのように鏡筒がないため3次元的な精度確保が必要です。さらに、環境温度変化の影響を仕様範囲内に抑えることも必要です。この両方を満たすため、この製品では4枚のミラーを1枚のベースプレートに取り付ける構造としています。そのベースプレート材料に

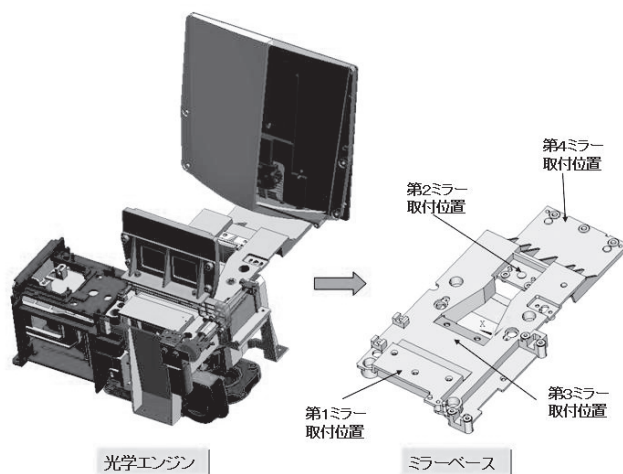


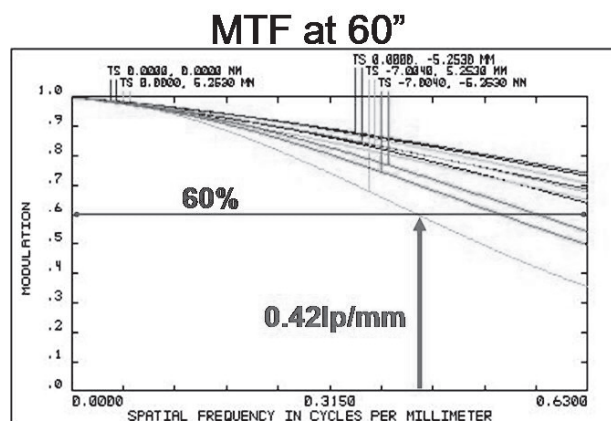
図4 光学エンジンの構成例とベースプレート

線膨張係数の小さいBMC系樹脂材用を採用しています。

このほかに実際の製品では、画面全体の結像性能に大きく影響を与えるM1およびM2の間隔に調整機能を、DMD™にはフランジバック調整機能も採用しました。図5は総合的な結像性能であるMTFを示します(シミュレーション値)。この設計ではDMD™の画素ピッチである $0.42\text{lp/mm}$ において実用的なレベルである60%以上の解像力を維持しています。

表 各ミラーの非球面定数 $a$ の設計例

	M1	M2	M3	M4
$r$	134.97422	112.7408	-3435.339	132.2968
$k$	-5.263296	-83.78333	0.0	-7.00602
$a1$	0.0	0.0	0.0	0.0
$a2$	5.292E-07	7.072E-06	-5.672E-08	-1.775E-08
$a3$	-7.085E-11	-1.023E-08	2.067E-11	6.856E-13
$a4$	8.673E-15	1.640E-11	-2.409E-15	-1.720E-17
$a5$	-5.678E-19	-1.435E-14	1.503E-19	2.908E-22
$a6$	1.767E-23	6.015E-18	-4.780E-24	-3.014E-27
$a7$	—	—	5.713E-29	1.481E-32
$a8$	—	—	—	-7.663E-39



Each line of graph shows MTF curves at 5 grid points in right half image area. Calculation wavelengths are 650, 546 and 460nm.

図5 光学シミュレーションによるMTF設計例

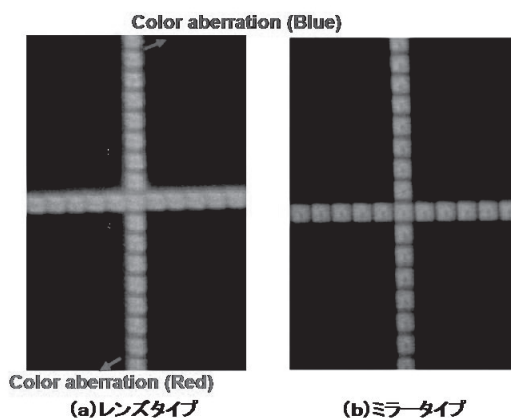


図6 屈折型レンズと反射型レンズの色収差例

## 5. 投写性能

図6は同じ光学エンジンに従来型の屈折型レンズおよびミラーレンズをそれぞれ搭載した製品レベルでの色収差です。先に述べたように、光学エンジンにはDMD<sup>TM</sup>単板方式を採用しており3板方式のような各色のデバイスのずれによる影響はないため、基本的に色収差はレンズのみによって決定されます。同図(a)に見られるように屈折型レンズを用いた場合でも実用上問題のないレベルですが、ミラーレンズではそれがなくいっそうの解像力向上が確認できます。また投写画面の歪みは、製造時の誤差やばらつきを含め1.2TV%以下と実用上問題ないレベルであり、明るさも2,000lmを達成しました。

## 6. おわりに — 使用状況と今後 —

図7は実際の各種設置状況です。使用例1は狭い会議室でも設置場所を気にせず、また人影が映る心配もないという利点が活かされています。また新しい市場への展開として、電子ペン・インタフェースを内蔵して大画面投写と電子黒板を同時に利用可能な製品「WT615」の商品化も行いました。今後はミラーの設計方法、加工技術の改善により、さらに低価格化を進め、ミラープロジェクタの市場拡大を図っていきます。

\*DMDは、Texas Instruments社の登録商標です。

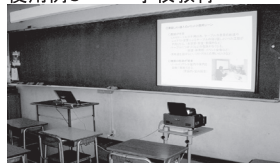
使用例1 ミーティングルーム



使用例2 パブリックディスプレイ



使用例3 学校教育



電子ペン機能を付加したWT615



図7 さまざまな設置例

## 参考文献

- 1) Ogawa, J et al., "Super-Short-Focus Front Projector with Aspheric-Mirror Projection System", SID'04 Digest, 12.2, pp.170-173(2004)
- 2) プロジェクタの最新技術, シーエムシー出版, p221-232
- 3) Shikama, S et al., "Optical System of Ultra-Thin Rear Projection Equipped with Refractive-Reflective Projection Optics", SID'02 Digest, 46.2, pp.1250-1253(2003)
- 4) D.Korsch, "Reflective Optics", Academic Press, Inc.(1991)
- 5) Daniel J.Schroeder, "Astronomical Optics Second Edition", Academic Press, Inc.(1999)
- 6) R.N.Wilson, "Reflecting Telescope Optics(特)" A&A Library, Springer
- 7) 高野 栄一, レンズデザインガイド, 写真工業出版社, p59(1993)

## 執筆者プロフィール

安形 一宏  
NECビューテクノロジー  
開発本部第4技術グループ  
マネージャー

小川 潤  
NECビューテクノロジー  
開発本部第4技術グループ  
マネージャー

古市 邦高  
NECビューテクノロジー  
開発本部第4技術グループ  
主任

福永 博昭  
NECビューテクノロジー  
開発本部第4技術グループ  
主任

武内 直  
NECビューテクノロジー  
開発本部第4技術グループ  
主任

●当社のプロジェクタ商品情報は下記をご覧ください。

関連URL: <http://www.nevt.co.jp/>