

反射型液晶パネル対応プロジェクター光学系

佐 藤 浩

Projection Optical System for Liquid Crystal on Silicon Device

Hirosi SATO

LCOS (liquid crystal on silicon) device is well known for its superior characteristics such as high resolution, high contrast, high aperture ratio. Projection optical system for LCOS device was generally large size because of its complex structure. Canon's proprietary AISYS (aspectual illumination system) makes it possible to incorporate LCOS in a compact projector, previously an impossible goal in projector design. Despite its compact size, optical system effectively controls the light from the projector lamp, maximizing the potential of the LCOS to achieve high level of both brightness and contrast. This report explains about the characteristics of LCOS, traditional optical system, problem of traditional optical system. And moreover explains details of AISYS, illumination system, color separation/recombination optical system, projection lens.

Key words: LCOS, projector, optical system, contrast, illumination

デジタル技術や映像技術の発展に伴うマルチメディア化が進展する中で、映像投影装置としてのプロジェクターは大きく発展を遂げてきた。プレゼンテーションや展示におもに使用されるデータプロジェクター、大画面 TV として普及しつつあるリアプロジェクション TV、家庭での DVD 鑑賞用として一般化されはじめたホームシアター用プロジェクターなどが挙げられる。その中で、反射型液晶パネル (LCOS) を用いたプロジェクターは、LCOS が本来もつ高解像特性や高い開口率、高コントラストといったすぐれた特徴を期待されつつも、その性能を十分に生かすことができずにきた。そのおもな原因は、DLP* (digital light processing) や透過型液晶を用いたプロジェクターに対して光学系が複雑であること、それにより装置が大型化してしまうことがおもな原因であった。筆者らは、LCOS パネルのもつ高い性能を十分に発揮させることが可能な小型で高性能なプロジェクター用光学系 (AISYS) の開発に成功したので、その結果を報告する。

1. LCOS パネル

1.1 構造と特徴

LCOS (liquid crystal on silicon) は、画素を形成するバックプレート LSI のミラー電極の下に駆動回路を形成する構造をとるため、透過型液晶 (LCD) に比べ、開口率を高く保てることから高解像化に適している。また、液晶層を往復して透過するため、液晶層の厚みが半分で済むことにより、高速駆動に対するメリットも大きい。

1.2 動作原理

LCOS では、液晶間に電圧を印加したとき、捻れて配列した液晶の複屈折により入射光の直線偏光が 90 度回転することを利用し、PBS (polarization beam splitter) の検光作用により、LCOS の各画素からの反射光を投影光として利用する。つまり、s 偏光で PBS に入射した光は偏光分離面で反射された後、LCOS に入射し、オン信号の画素からの光だけ p 偏光に変換され投射レンズ側に導かれる。

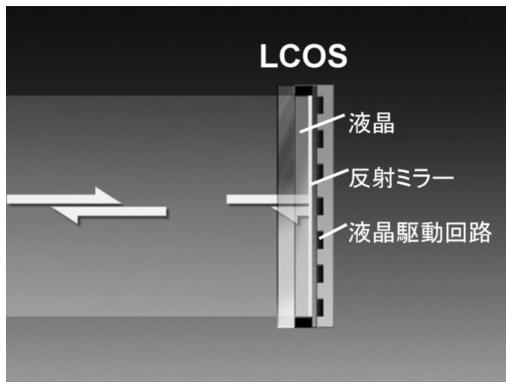


図1 反射型液晶 (LCOS).

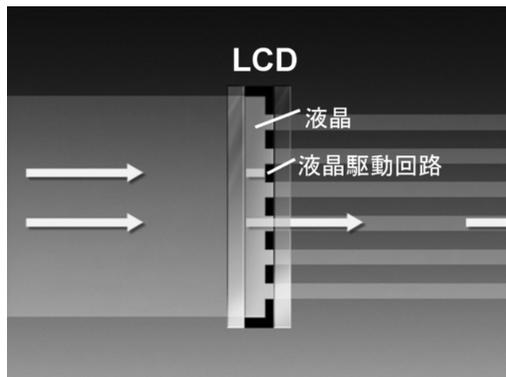


図2 透過型液晶 (LCD).

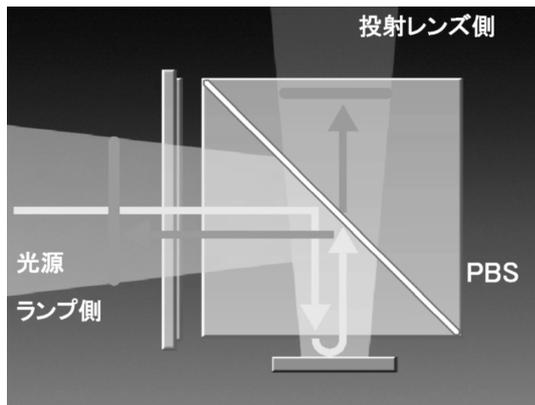


図3 3PBSによる検光.

2. 反射型液晶パネル対応プロジェクターの従来の光学系

2.1 色分離合成光学系

図4に示す3PBS方式は、照明系からの白色光を各色のパネルに導くためにダイクロイックミラーを用い、各色のパネルごとに検光作用を受け持つPBSを配置し、パネルからの反射光を合成し、投射レンズに導くためのクロスダイクロプリズムを用いた構成である。ダイクロイックミ

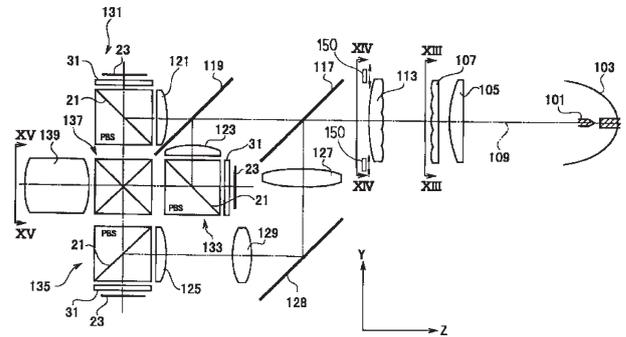


図4 3PBS方式¹⁾.

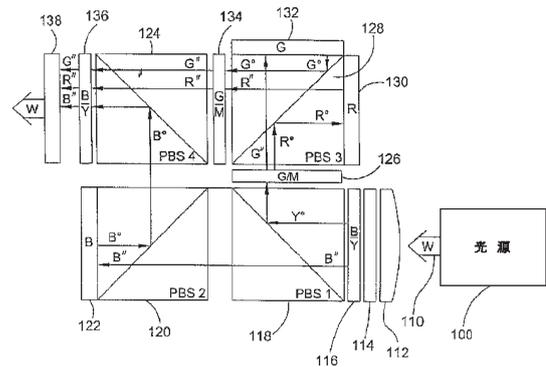


図5 ColorQuad方式²⁾.

ラーによる光路の取り回しと、プリズム4個分のスペースが必要であり、比較的大きなスペースを必要とするが、各色ごとにPBSの特性を最適化できる点で、高いコントラスト性能を達成することができる特徴がある。

図5に示すColorQuad方式は、入射光束に対して特定の波長域の光の位相を90度回転する機能をもつ波長選択性位相板とPBSを組み合わせることによって、照明系からの白色光の色分離機能と各色のパネルからの反射光を検光する検光作用と、各色のパネルからの反射光を合成する機能を4つのPBSにもたせることにより、3PBS方式で大型化していたダイクロイックミラーによる光路の取り回しを必要とせず、比較的小型化が可能である。

2.2 照明光学系

このような色分離合成光学系に加え、装置の大きさを左右する要素として照明光学系がある。LCOSの場合、パネルからの反射光を検光するPBSを使用するため、PBSに入射する光束の角度をできるだけ45度に近づける必要がある。45度からずれた光束が漏れ光として信号光に混ざってしまうために、特に黒表示の場合のノイズ光としてコントラストを低下させてしまうからである。このため、従来は図6に示すように、照明光学系の焦点距離をできるだけ長くして、平行光に近い状態でPBSの偏光分離面に

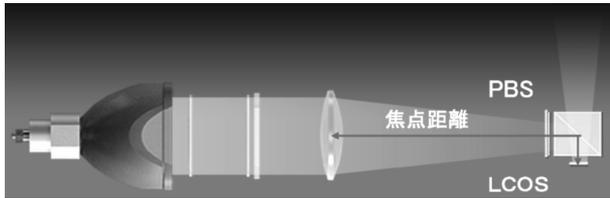


図6 従来の照明光学系.

入射させることにより、コントラストの低下を防止する手法がとられてきたが、このことが装置の大型化につながっていた。

3. AISYS の構成と特徴

3.1 AISYS の構成

AISYS は aspectual illumination system の略であり、キヤノン製データプロジェクター SX50 に搭載されており、筆者らが独自に開発した光学エンジンである。図7に、SX50 の光学系全体図を示す。AISYS は、3枚の LCOS パネル、AISYS 照明光学系、色分離合成系から構成される。

3.2 AISYS の特徴

AISYS は LCOS パネルのすぐれた性能を最大限に引き出すために光を精密にコントロールする。それにより、高輝度 (2500 lm)、高コントラスト (1000 : 1)、高精細な画質を実現した。

また、AISYS はボディーの小型化にも大きく寄与し、LCOS 搭載プロジェクターで世界最小最軽量を実現した。

4. 照明光学系

AISYS 照明光学系において、小型化と高コントラスト化を両立するために、どのような工夫をしたのかについて説明する。

LCOS パネルの高い階調性と高コントラスト性を十分に発揮させるためには、LCOS パネルに入射する光が PBS の偏光分離面に対して 45 度の角度で入射するように、照明光の光束を光軸と平行にする機能をもつ照明光学系が必要である。

そこで筆者らは、2枚のシリンダリカルレンズ (円筒形レンズ) によるコンプレッサーレンズを採用した独自の AISYS 照明光学系を開発することで、この要求に応えている。また、小型化と高コントラスト化を両立するため、AISYS 照明光学系は図8に示すように水平方向と垂直方向で光学系が異なり、aspectual (縦と横で非対称なという意味がある) という単語でその構成を表している³⁾。

光源ランプの光は、シリンダリカルレンズアレイとコンデンサーレンズにより平坦化され、コンプレッサーレンズ

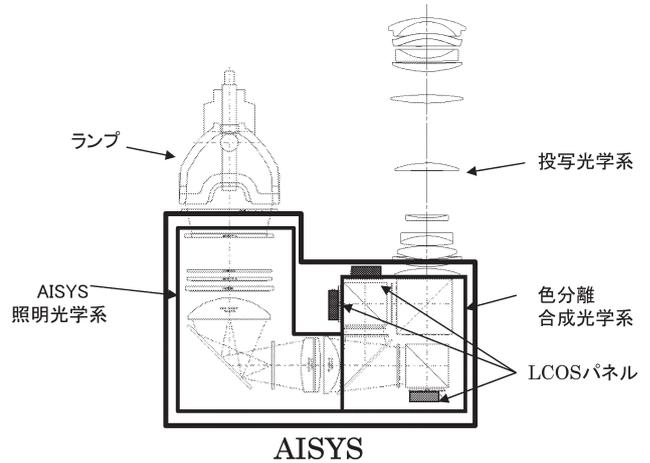


図7 光学系全体図と AISYS.

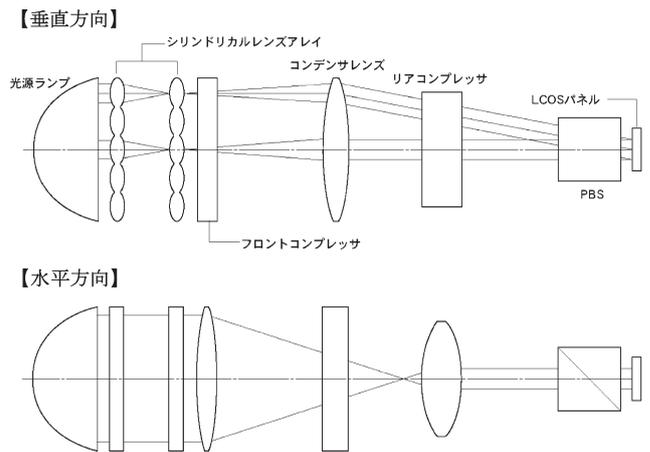


図8 AISYS 照明光学系の概略図.

により、偏光分離面の角度方向である水平方向のみ平行光化される。PBS の偏光分離面に対して 45 度の角度で入射した光は、偏光方向によって透過または反射して分離されるが、それ以外の角度で偏光分離面に光が入射すると、光漏れが発生してコントラストの低下を引き起こす。

AISYS 照明光学系を通過した光の場合、水平方向成分は PBS の偏光分離方向 (この場合は水平方向) にほぼ平行な光が 45 度の角度で入射するため、光漏れの発生がなく画像の高コントラスト化が可能となっている。また、垂直方向成分は Fno の明るい照明光学系となっているため、小型で高輝度な系を実現している。まとめると、水平方向が高コントラスト、垂直方向が小型・高輝度化の役割を担う光学系とすることで両立を図っている。

5. 色分離合成光学系

5.1 構成

色分離合成光学系の構成について説明する。

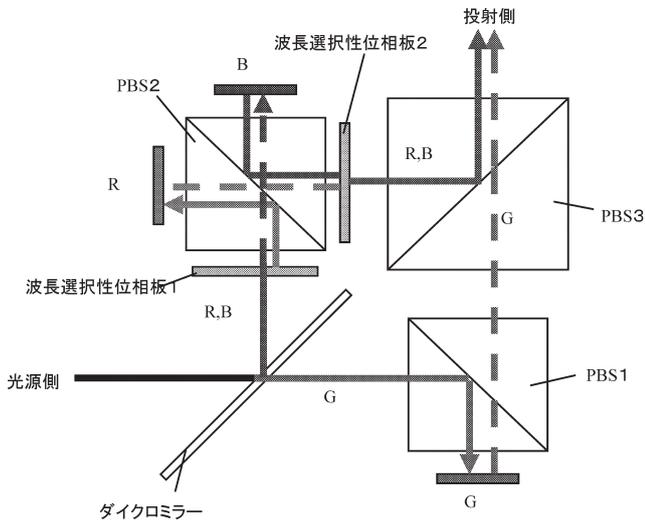


図9 色分離合成光学系.

液晶プロジェクターにおいて、画像表示のためにはパネルからの光を検光する検光子が必須となる。透過型液晶パネルの場合はパネルの近傍に偏光板が設けられるが、LCOSパネルの場合は、反射型であるので、検光子として偏光ビームスプリッター (PBS) が用いられる。PBSはプリズム形状をしており、色分離合成光学系の一部に組み込まれることとなる。

構成としては、白色をRGBの3色に分離する色分離光学系と、RGBの3色を合成する色合成系と、PBSを独立して組み合わせる方法がシンプルである。SX50では、PBSにおいて検光作用と色分離合成作用を実現する構成を採用することによりレイアウトの小型化を実現している。

5.2 色特性

光学系の色特性について説明する。

図9に、SX50における色分離合成光学系の詳細図を示す⁴⁾。図中実線はs偏光状態を、点線はp偏光状態を表している。

光源側からの白色光は、ダイクロミラーによりGの光とR、Bの光に分離される。ここで、波長選択性位相板をPBS2の入射側と出射側に配置し、PBSを用いた色分離合成を行っている。波長選択性位相板は、入射光の偏光状態に対してダイクロイックな作用をする素子である。図9における第1の波長選択性位相板は、Rの光の偏光状態(s)は維持したまま、Bの偏光状態をp偏光に変換する作用を有し、波長選択性位相板2は、Bの光の偏光状態(s)は維持したまま、Rの偏光状態をs偏光に変換する作用を有する。

最終的な色合成は、PBS3によりGの偏光状態とR、B

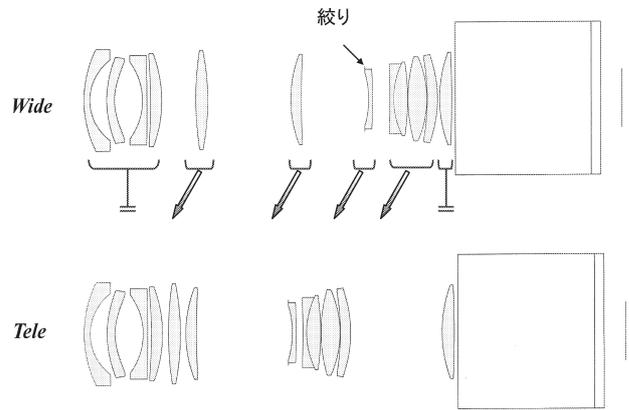


図10 投射レンズの構成とズーム.

の偏光状態の違いにより色合成が行われ、カラー画像が投射される構成である。

ここで、PBS1はGの光に対する検光子であり、PBS2はR、Bの光に対する検光子である。

5.3 コントラスト

光学系のコントラストについて説明する。

投射画像のコントラストは、色分離合成光学系における検光性能に左右される。色特性の説明ではPBSの検光作用を述べたが、PBSの偏光分離特性は薄膜によって実現されているので、入射する光の偏光分離面に対する入射角度により検光特性が変動してしまう問題がある。

SX50は前述のAISYS光学系を採用し、偏光分離面に対して45度で入射する断面方向には大きな角度で入射しないように光学系を構成しているので、PBSで高い検光作用を実現している。

ここで、PBSの検光性能を偏光状態で考えると、s偏光のほうがp偏光よりも高い検光性能を示す。そのため、検光子として使われるPBS1, 2はs偏光が検光されるように構成するのが望ましい。ただし、図9の構成でPBSで色分離合成も兼ねているので、Bの光がp偏光で検光されてしまい、RGの検光性能と差が生じてしまう。このため、SX50では、波長選択性位相板2とPBS3の間に、Bに対して検光作用を有する偏光板を設けている。

これにより、光学系による光漏れを大幅に低減することが可能となった。

6. 投写光学系

6.1 レンズ構成

投写レンズの光学系構成について説明する。

図10に、SX50における投写レンズの構成を示す。

11群12枚のレンズ構成であり、6群構成4群移動のズームタイプである。第1群と第6群が固定群であり、第2

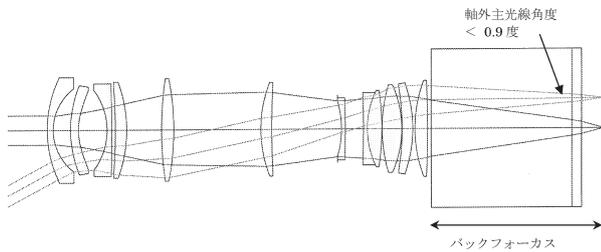


図11 レンズ構成とバックフォーカス。

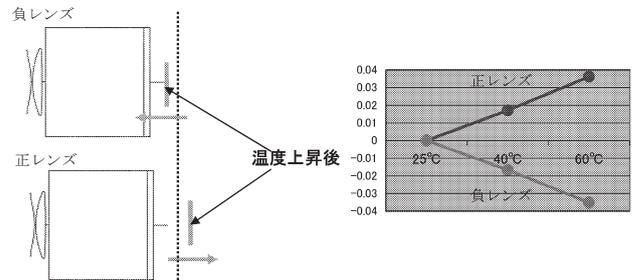


図12 温度変動による焦点位置ずれ。

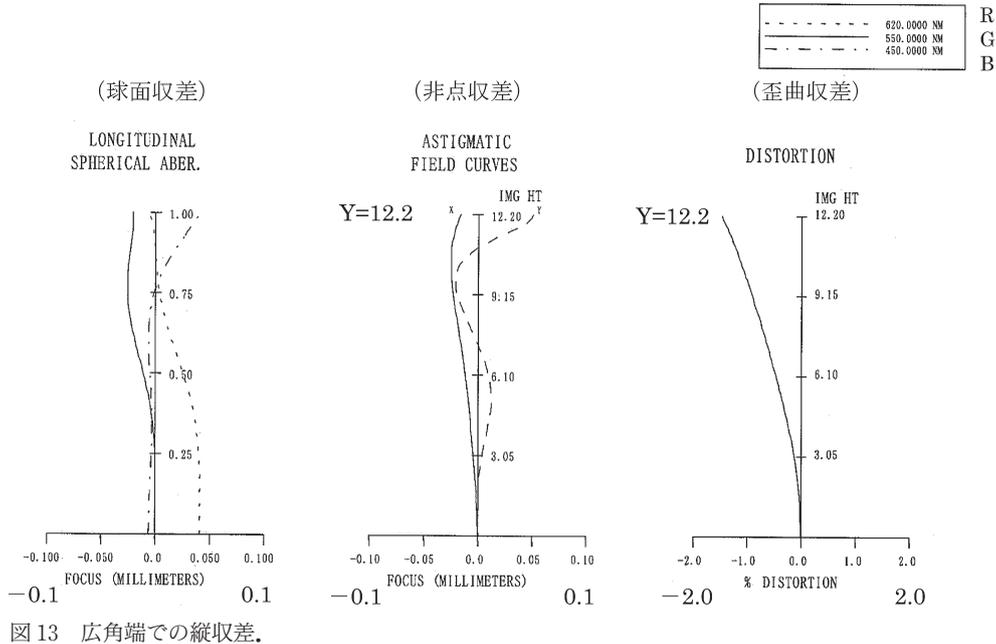


図13 広角端での縦収差。

群から第5群までが移動群である。また、第1群がフォーカス群である。各群の屈折力は、スクリーン側から順に、負正正正正である。スクリーン側から*i*番目のレンズを G_i とすると、非球面レンズは G_2, G_{11} であり、PMOレンズ（プラスチック・モールドレンズ）を用いている。第1群は、レンズ4枚から構成され、各レンズの屈折力はスクリーン側から負負負正であり、第2群は正の凸レンズ、第3群は正の凸レンズ、第4群は負の凹レンズ、第5群はレンズ4枚から構成され、各レンズの屈折力はスクリーン側から負正正正であり、第6群は正の凸レンズである。

6.2 光学系の特徴

投写レンズは、大口径 $F1.85$ で1.7倍の高倍率を実現したズームレンズである。

第1の特徴としては、長いバックフォーカスであることである（図11）。反射型液晶パネルを用いた光学系では、投写レンズとパネルの間にPBSを2個配置しなくてはな

らないため、同インチサイズの透過型液晶パネルのプロジェクターと比較すると、投写レンズのバックフォーカスを約2倍長くする必要がある。バックフォーカスの増大は、投写レンズの大型化や諸収差、特に歪曲収差の増加の問題を伴うが、SX50の投写レンズでは、非球面レンズを2枚使用することで、小型化と諸収差の補正を行っている。

第2の特徴としては、温度上昇による焦点位置ずれの低減を行っていることである。PMOレンズでは、ガラスに比べ温度上昇による屈折率変化が大きい。図12は、負屈折力のPMOレンズと、正屈折力のPMOレンズのそれぞれが、温度上昇により焦点位置のずれる様子を示している。

負屈折力のPMOレンズでは、温度上昇によりピントがアンダー方向に、正屈折力のPMOレンズではオーバー方向にシフトする。上記焦点位置ずれに対する一般的な対策としては、PMOレンズ自体の屈折力を極力小さくすることであるが、本投写レンズでは、正レンズのオーバー方向

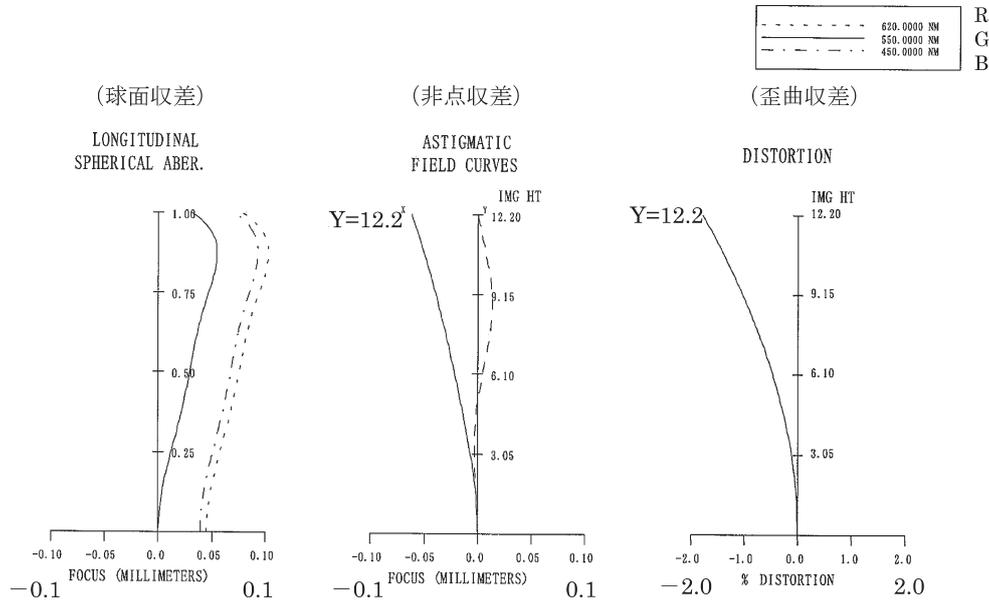


図 14 望遠端での縦収差。

焦点位置ずれと負レンズのアンダー方向焦点位置ずれが相殺してほぼゼロとなるようにして、温度上昇時の焦点位置ずれが生じないようにしている。

その他の特徴としては、投影画面周辺部において光量低下を極力抑えるために、軸外主光線角度を 0.9 度以下としていること、および周辺部での RGB の色ずれを小さくするために、波長 550 nm を基準とした 620 nm と 470 nm における倍率色収差が 0.5 画素以下となるようにしていること、などがある。

6.3 光学性能

投写レンズの結像性能について説明する。

図 13 は、広角端、投写距離 2.1 m での縦収差を示した図である。左から、球面収差、非点収差、歪曲収差である。SX50 の投写レンズでは、歪曲収差の改善のために、負屈折力の G₂ レンズを非球面としている。これは、スクリーン側のレンズを正屈折力とした場合には歪曲収差には有利であるが、前玉径が大型化してしまうため、G₁、G₂ レンズを負屈折力のメニスカスレンズとし、光軸からの高さの絶対値の高い G₂ レンズを非球面として歪曲収差を補正している。非球面レンズは PMO レンズであるため、外気に直接接触して劣化しないように、G₁ でなく G₂ を PMO

レンズとしている。

図 14 は、望遠端、投写距離 2.1 m での縦収差を示した図である。広角端のときと比較して、若干非点収差が悪化しているが、実用上問題ないレベルである。また、軸上色収差は、広角端での G 像に対する R 像、B 像のずれ量が望遠端でも大きく変化しないようにしている。

反射型液晶 (LCOS) パネルの高い特性を十分に発揮させることができる光学エンジンとして新規に開発した、AISYS の技術を説明してきた。今後は、AISYS のさらなる進化を目指し、プロジェクター技術の発展に取り組んでいきたいと思う。本原稿の作製に当り協力をいただいた、奥山敦氏、児玉浩幸氏、須藤貴士氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) 相崎隆嗣：特開 2001-142028.
- 2) ジョンソン・クリスティーナ・エム：特開 2002-357708.
- 3) 小出 純：特開 2004-245977.
- 4) 奥山 敦：特開 2004-294475.

(2006 年 2 月 10 日受理)