

3板マイクロミラーデバイスによるデジタルシネマ用プロジェクション光学系

林 宏太郎

Projection Optics for Digital Cinema Using Three Panels Digital Micro Mirror Device

Kohtaro HAYASHI

For digital cinema use, the projection system that has three DMD (digital micro mirror device) panels is already on market. I explain about the history of the development for this three panels DMD projection optics.

Key words: digital cinema, digital micro mirror, projector

映画の業界においては、従来のフィルムによる映画の撮影、配信、上映から、デジタル信号による撮影、配信、上映が始まっている。このシステムは、撮影・映像製作から大容量通信による配信、デジタル信号を忠実に上映する投影システムすべてにおいて、従来のフィルムシステムから大幅に置き換わるシステムであり、大きな市場規模が期待されている。日本では、推進団体 DCCJ (Digital Cinema Consortium of Japan) が、実験的に 4K とよばれる画素数 4096×2160 の解像度で、撮影から上映までのデジタルシネマシステムの検討・推進を行い、米ハリウッドの推進団体 DCI (Digital Cinema Initiative) との協調が図られ、DCI によるデジタルシネマの規格制定に関与してきた。この 4K のシステムは、Optics Japan 2005 でシンポジウム「デジタルシネマネットワークと光技術の新しい接点―」として紹介されている¹⁾。また米国では、投影システムに関して、1997 年より米 Texas Instruments 社 (TI 社) によってデジタルマイクロミラーデバイス (以下 DMD^{*1} と表記) 素子を用いたデジタルシネマ用投影システムの開発が行われ²⁾、すでに商用として先行しており、DCI の活動にも貢献している。ここでは、投影システムですでに米国中心に商用として先行している TI 社の DMD による投影システム DLP Cinema^{*1} に関して、初期

段階から現在までの光学系の発展を中心に述べる。

1. 1.2K デジタルシネマ光学系

TI 社の DMD 素子は、すでに各種プロジェクターに多く採用されている micro display device のひとつで、画素に対応する 10 数 μm 程度のマイクロミラーをデジタル情報に合わせてマイクロミラー対角線を軸に回動させ、傾きを変えるものであるが³⁾、デジタルシネマ用プロジェクターの開発当初は、当時ビジネス用途として既存であった 1 画素がピッチ $17 \mu\text{m}$ 角で傾き角 ± 10 度 SXGA (1280×1024 画素) の DMD 素子を用いており、1997 年には、この既存の素子を利用した 1.2K とよぶデジタルシネマ用のプロトタイプが TI 社により作られている。映画の縦横アスペクト比の代表的なものは、ビスタビジョンとよぶ $1.85 : 1$ 、シネマスコープの $2.39 : 1$ などがあるが、このシステム自体の $5 : 4$ のアスペクトを活用するため、投影レンズの前に映像の左右方向だけ拡大するアナモルフィックコンバーターレンズを搭載し⁴⁾、1.5 倍、あるいは 1.9 倍のアスペクト変換を行った。この 1.2K のプロトタイプは明るさ、コントラストの改善が行われ、最終的に、明るさ 13000 ルーメン、コントラスト $1000 : 1$ の性能を達成し⁵⁾、2000 年には商用化が行われた。

コニカミノルタオプト(株) (〒589-0021 大阪狭山市今熊 6-300) E-mail: kohtaro.hayashi@konicaminolta.jp

*1 DMDTM, DLP CinemaTM は米 Texas Instruments 社の商標。

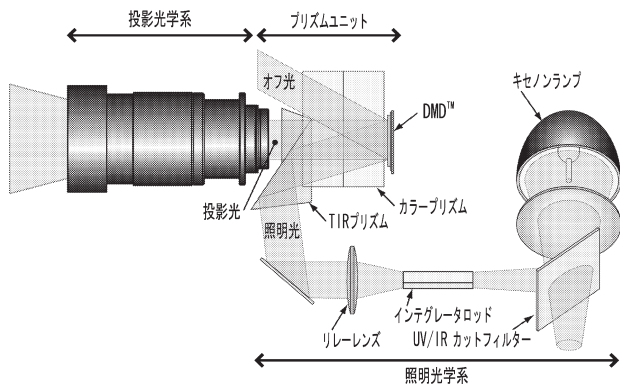


図1 3板DMDプロジェクターの構成図。

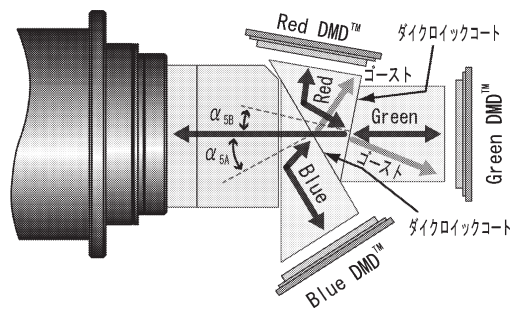


図2 5ピースプリズムユニットのカラープリズム部構成図。図1のプリズムユニットの上方から見た図と色分離合成光路を示す。

2. 2K デジタルシネマ光学系

1.2Kの開発後、デジタルシネマ専用の素子として、解像度2Kとよばれる新しいDMD素子が開発され、これに伴い、光学系も2K素子の解像度を生かすべく、新しい光学システムがTI社より提案され、2003年末には商品化されている。

2K用のDMD素子は、画素ピッチ13.68 μm 、2048 \times 1080画素の1.2型の素子で、1.2K時の ± 10 度のマイクロミラー傾き角から、よりコントラストと明るさアップを図るため傾き角 ± 12 度に広げられ、アスペクト比もビスタビジョンに近い設定となっている。

DMD素子を用いたデジタルシネマ用プロジェクターは、大規模業務用システムと同じく、R、G、B3色に3枚のDMD素子を用いる3板プロジェクターである。

図1は、3板プロジェクターの光学系構成図を示す。大きくDMD素子3枚（うち2枚は図1に見えず）を含み、照明光と投影光そしてオフ光を分離するプリズムユニット、数kWクラスのキセノンランプからプリズムユニットに照明光を導く照明光学系、およびDMD素子の表示画像を投影する投影光学系からなる。プリズムユニットは、照明光学系からの光路と投影光学系への光路を分離するTIR (total internal reflection) プリズムと、照明光を3色に色分離し、かつ3色のDMD素子からの色合成を兼ねるカラープリズムからなる。カラープリズムは、図1の上面から見た構成が図2であり、図2の断面で色分離合成を行う。図1のTIRプリズムの2つのプリズムブロック間および、図2のカラープリズムの3つのブロック間は10数 μm ～数十 μm のエアギャップ（空気層）を介している。照明光学系は、人工石英製のロッドプリズムをもつインテグレータロッド方式の照明光学系で、DMDの表示域に非常に良好に結像させるリレー光学系により、DMDの表示域外への不要光を抑え、光熱によるダメージを防

ぐ。投影光学系は、上記プリズムユニット長のレンズバックをもつロングレンズバック、テレセントリック光学系である。

デジタルシネマ用プロジェクターは、たとえば20mのスクリーン幅では、18000ルーメン以上の超高輝度プロジェクターが要求される（スクリーンゲイン1.8でスクリーンの明るさが14フットランバート相当）。光学系の構成部分のプリズムユニット、照明光学系、投影光学系それぞれが、2万ルーメンクラスの明るさを達成し、シネマに求められる高画質を得るための工夫がなされている。

2.1 6ピースプリズム

既存の3板プロジェクターから、2K専用のDMD素子に変更されたことに従い、いくつかの改善が行われている。1つは、5ピースプリズムから、6ピースプリズムとよぶプリズムユニットの方式の変更がある。5ピースとは、2つのプリズムブロックからなるTIRプリズムと、3つのプリズムブロックからなるカラープリズムの5つのブロックを示す。12度DMDの場合、図1の断面においてDMD素子に対して24～26度（空気換算）で照明光が入射し、ほぼ垂直に投影光（＝オン光）が射出する。さらに、マイクロミラーがオフ状態の場合は、素子に対して48～50度（空気換算）のオフ光が射出する。ダイクロイックコーティング面をもつカラープリズムは、通常、入射角や偏光によって特性が異なる入射角依存性、偏光依存性をもつため、照明光、投影光、そしてオフ光の分光特性が異なる。これは、本来透過すべき色光が照明光では透過して投影光では反射するなど、光量の損失やゴーストを発生させる。投影光、オフ光とも、特にDMD側に到達するゴーストはDMD素子やその周辺の構造物などに当たり、フレアおよび熱的問題を発生させる。

2K用のDMD素子を用いた、DLP Cinemaシステムにおいては、これらを低減させるために、カラープリズムを

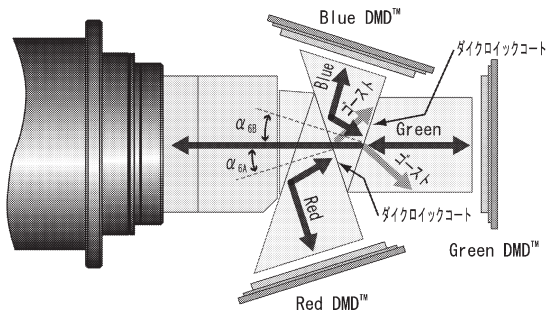
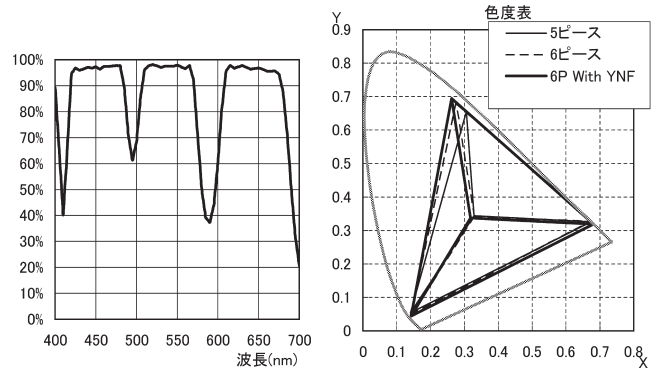


図3 6ピースプリズムユニットのカラープリズム部構成図。



(a) (b)

図5 (a) イエローノッチフィルターの分光透過率と (b) 5ピース→6ピース, 6ピースでのイエローノッチフィルターによる色純度改善効果。

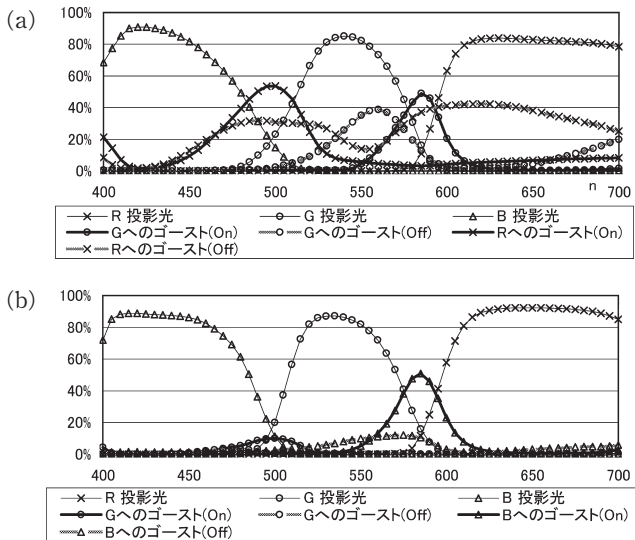


図4 カラープリズムの照明光から投影光(=オン光)の分光透過率とゴースト光。(a) 5ピースの場合。(b) 6ピースの場合。各色の照明～正規投影光, オン/オフ光状態にてGに達するゴーストとRあるいはBに達するゴーストを示す。5ピースと6ピースでは色分解の順がRとBで逆なため, ゴーストも逆の色素子に達する。

4つのプリズムブロックで構成させた6ピースプリズムとよぶ方式を採用している(図3)。5ピースに比べて, ダイクロイック面への入射角が大きく変わり, 図2および図3の入射角は $\alpha_{5A} > \alpha_{6A}$, $\alpha_{5B} > \alpha_{6B}$ となる。これにより, まず, ゴースト光をできるだけダイレクトにDMDに達しないようにしている。また, 最も入射角の大きい入射角 α_{5A} を α_{6A} にまで小さくすることで, 偏光による分光特性隔差を少なくし効率アップに貢献している。図4は, 12度DMDにおいての5ピースと6ピースでの投影光, およびDMD側に達するゴースト光の分光特性を示す。

6ピースの採用により, B投影光のG側カーブ, G投影光のB側カーブが急峻となり, 色純度改善と3%程度の効率アップとなるとともに, DMD側に達するゴーストを大幅に低減させており, 数kWのキセノンランプを用いるDLP Cinemaシステムにおける, 熱, フレアの問題を

改善している。

2.2 イエローノッチフィルター

2Kデジタルシネマ用プロジェクターには, イエローノッチフィルターとよぶ, 図5(a)のような分光特性をもつフィルターが照明光学系にある。イエローノッチフィルターにより, プリズムに入射する前にイエローおよびシアン成分の分光をある程度カットし, 投影光の各R, G, Bの色純度向上, ならびに上記, プリズム内のゴーストのさらなる低減を図っている⁶⁾。図5(b)に, イエローノッチフィルターによる色純度改善を色度図上に示す。

3. 2K デジタルシネマ用投影光学系

プリズムユニットの改善に加え, 投影光学系も従来の3板業務用システムの投影光学系から, 透過率の改善, MTFおよび倍率色収差の大幅な改善を図っている。従来の3板業務用レンズに対し, イメージサークルやレンズバック, 倍率比の違いがあるので, 直接的な比較はできないが, 表1に示すように, 2K用に高性能画像を得るために, およそ倍ほどの高精細に値する設計性能を達成している。図6に製品レンズの写真, 表2にラインナップを示す。

3.1 投影光学系の透過率改善

投影光学系の光学性能はレンズ枚数を増加させることでアップを図れるが, 大型レンズのため, レンズ枚数増加で透過率の低下が激しい。また, 面間反射などが増え, コントラスト低下の要因にもなる。まず, 透過率確保のため, レンズ枚数の制限と使用ガラスの制限, 具体的には図7に示すように, 青波長域で透過率の低い高屈折率, 高分散のガラスを避けている。また, 本光学系で多数使われているフッ化物ガラス専用の高透過率ARコートも採用している。

表1 従来3板用投影光学系と2K用投影光学系の設計性能等の比較.

		業務用途 (レンタル&ステージング) 投影光学系	2K シネマ用投影光学系
素子スペック	画素数	1280×1024	2048×1080
	画素ピッチ	17 μm	13.68 μm
	素子インチ数	1.1 型	1.2 型
	DMD 傾き角	10 度	12 度
主 値	プリズムタイプ	102.5 mm 5 ピース	116 mm 6 ピース
	レンズバック (in Air)	>84 mm	>98 mm
	Fno	F3	F2.5
光学性能 (設計値)	MTF	Center>80%/30 本 Corner>70%/30 本	Center>90%/36 本, 70%/72 本 Corner>80%/36 本, 60%/72 本
	倍率色収差	<0.5 画素=8.5 μm	<0.25 画素=3.4 μm
	透過率	白色平均>85%	白色平均>88% R-G, G-B 隔差<5%

表2 2K用投影光学系のラインナップ.

投影比	Fno	焦点距離 (mm)
1.0 : 1	F2.5	29.0
1.25~1.45 : 1	F2.5	35.3~41.0
1.45~1.8 : 1	F2.5	40.7~50.9
1.8~2.4 : 1	F2.5	50.7~67.8
2.2~3.0 : 1	F2.5	62.4~84.8
3.0~4.3 : 1	F2.5	85.0~121.6
4.3~6.0 : 1	F2.5	122.8~172.3
5.5~8.5 : 1	F2.5	156.5~243.1

シネマ用および業務用を含めて投影比 (投影距離とスクリーン幅の比) の異なる光学系を製品化している.



図6 2K用投影光学系 (写真).

3.2 投影光学系の色収差の改善

性能面では特に向上が困難な二次の色収差を補正するために、異常部分分散比をもつガラスを効果的に配置している.

標準的ガラス (本説明では、g 線 F 線間の各硝種の部分分散比 θ_{gF} を v_d でプロットしたとき、基準硝種 K7 と F2 を結ぶ直線上にあるガラスとする) を組み合わせた光学系では、特定の2波長 (本説明では C 線 F 線間) の色収差が十分補正されても、その他の波長との色収差が発生する

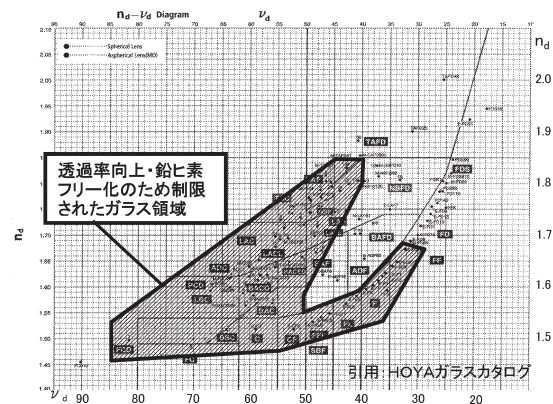


図7 2K用投影光学系の使用ガラスマップ. 通常ガラスマップから透過率確保を考慮し、ほぼ枠内の硝種に限定.

二次の色収差がよく知られており⁷⁾、プロジェクター光学系において R, G, B 3 色の色収差を補正することが大きな課題である. 本光学系のようにレンズバックが長い光学系では、仮に標準的ガラスで構成した場合、C 線 F 線間がよく補正されても、g 線 F 線間で 30~40 μm 程度の二次の倍率色収差 ($h=17 \text{ mm}$) が発生する. 絞りより後の正レンズに正の異常部分分散比 (θ_{gF} が標準ガラス直線よりプラス側) のフッ化物ガラス、負レンズにランタン系などの負の異常部分分散比のガラスを用い、それでも補正不足であるため、絞りより前部の効果的な負レンズにフッ化物ガラスを用いて、二次の倍率色収差を 1~2 μm 程度まで改善させている. 図8は、光学系群のうち、(a) 広角、(b) 標準投影光学系の各レンズの二次の色収差補正量である. ΔLC は倍率色、 ΔAC は軸上色収差の補正を示す. 特に ΔLC は、前群、後群のレンズで積極的に負に補正を行うことで、R, G, B 全色において倍率色収差を非常に小さく抑えている.

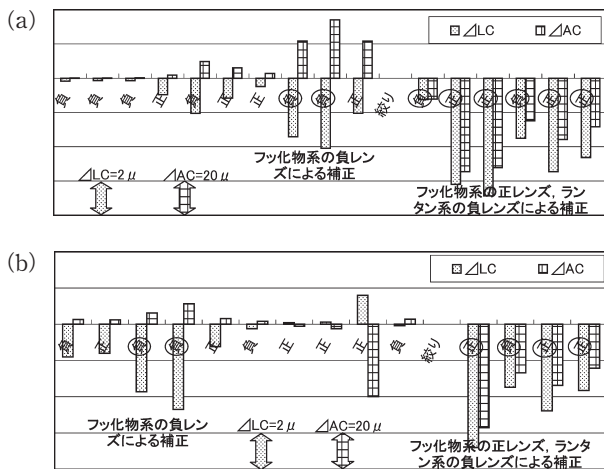


図8 個別レンズの異常部分分散 $\Delta\theta_{RF}$ による倍率色収差の補正効果。二次の色収差によって発生する $+30\sim 40\mu\text{m}$ の倍率色収差を各レンズの異常部分分散性によるマイナス方向への補正を積み上げて低減させている。左側がスクリーン側レンズ。(a) 広角投影光学系の各レンズの二次の色収差補正、(b) 標準投影光学系の各レンズの色収差補正。

2K画素のマイクロミラーデバイスを用いたデジタルシネマ用プロジェクション光学系では、2万ルーメンクラスの高輝度での、光学系および構造物への熱的負荷、フレアを低減、色純度を向上させるために、新たに6ピースプリズムやイエローノッチフィルターが採用された。同プロジェクションの投影光学系においては、投影画質をよくす

るために、透過率の確保を行いつつ、従来レンズに比べて、倍率色収差、MTFの大幅な改善を行い、従来のフィルムシステムに引けをとらない映像を得ることができた。本システムは、特にアメリカを中心に商用として順次導入されており、フィルムによるシステムからの置き換えが推進されようとしている。

なお、本稿の作成にあたり、Texas Instruments社よりサポートいただきましたことを感謝いたします。

文 献

- 1) 吉村 真：“デジタルシネマ用プロジェクタ”，*Optics Japan 2005 Proceeding* (2005) pp. 456-457.
- 2) W. B. Werner and D. S. Dewald: “Application of DLP technology to digital electronic cinema—A progress report,” *140th SMPTE Technical Conference, October '98* (1998) pp. 99-103.
- 3) L. J. Hornbeck: “Current status and future applications for DMD-based projection displays,” *The 5th International Display Workshop* (1998) pp. 713-716.
- 4) D. S. Dewald: US patent No. 5,930,050.
- 5) L. J. Hornbeck, D. Darrow, G. Pettitt, B. Walker and B. Werner: “DLP Cinema™ projectors: Enabling digital cinema,” *SID Digest* (2000) pp. 314-317.
- 6) D. S. Dewald: US patent No. 6,231,190.
- 7) たとえば、高橋友刀：レンズ設計（東海大学出版会，1994）pp. 57-60.

(2006年1月23日受理)