

博士論文

回折格子を利用したプロジェクションシステムに関する研究

船造 康夫

2005 年 9 月 22 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報処理学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
博士 (工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

船造 康夫

審査委員： 千原 國宏 教授
横矢 直和 教授
木戸出 正繼 教授
眞鍋 佳嗣 助教授

回折格子を利用したプロジェクションシステムに関する研究^{*}

船造 康夫

内容梗概

本論文は，回折格子を利用したカラー再生が可能な新規なプロジェクション技術に関する研究である．

近年，大画面で高精細なディスプレイに対するニーズが非常に高くなって来ている．このようなニーズに応えるため PDP と直視型 LCD が薄型大画面 TV として市場に出つつある．今後民生用として広く普及するためには，更なる画質向上も必要と思われるが，低コスト化と消費電力の軽減が必須と言われている．

大画面ディスプレイ用としてよく知られている LCD プロジェクションは，PDP と直視型 LCD に比較し，低価格に加えて，最近では輝度，解像度等の画質の向上が著しく，大画面 TV 用のディスプレイとして注目を集めるに至っている．しかしながら，この LCD プロジェクションは 3 枚の小型 LCD を利用しており，光源からの光を三原色に分離し，3 枚の LCD パネルに入射後合成し投写レンズに導くという複雑な光学システムが必要である．本格的な民生用大画面 TV を考えた場合，この従来の 3 板 LCD 方式も光学構成の簡略化が必要と言われている．

このような状況を考慮し，本論文では簡単な光学システムを可能にするキーコンポーネントである新規な回折格子の研究・開発，およびこれを用いた単板方式の LCD プロジェクション（カラーグレーティング方式）について述べる．

回折格子は光の回折を利用してスペクトルを得る分光素子で，古くから分光器に用いられてきた．特に断面構造が鋸歯状（ブレードタイプ）で反射型の回折格子は，回折光の特定の次数への集中が出来，光の吸収がないため，原理的に光利

^{*} 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報処理学専攻 博士論文，
NAIST-IS-DT0361210，2005 年 9 月 22 日．

用効率が良く、しかも耐熱・耐光性に優れた性能を持っているため、LCD プロジェクション方式に向いていると考えられる。しかしながら、実際この回折格子を LCD プロジェクションに応用するためには、更に可視光の波長領域（400～700nm）での回折効率を良くすることと、光学システムへの配置を考慮して回折格子への光の入射角度の最適化を図る必要がある。本論文では先ずスーパーコンピュータを用いてこれらの条件を満足する最適パラメータを見出すためのシミュレーションを行った。シミュレーションは2つの媒質間で起こる現象を解析する境界要素法を用いて厳密な回折効率を求め最適化を行った。適切な光入射角度において回折格子の形状を決定するパラメータを最適化することにより可視光の波長全領域で約80%の回折効率を得られることが判明し、実際にこの設計に基づいて試作し断面形状を測定し所望の形状が得られていることを確認した。

次に上記の回折格子を利用し、光利用効率の向上を図った光学システム（プリズムアレイ式照明光学系）を開発した。本方式では超高压水銀ランプと新規設計のリフレクタで平行度の良い光線を生成する。ランプ光はP波とS波から成るが、偏光変換素子(Polarizing Beam Splitter：以降PBSと記述)、位相差板、ミラーおよびプリズムアレイなる光学素子を通過させることによりS波をP波に変換し光利用効率を向上させ、回折格子に入射し、1枚のLCDを通過後、映像情報を含んだ光になり投写レンズでプロジェクションされる。

この新規光学システムを用いた40インチリアプロジェクションTVの試作も行った。スクリーン輝度 400 cd/m^2 、水平解像度 600 TV 本、消費電力 200W の省電力という良好な結果が得られた。

本論文で述べたカラーグレーティング方式の単板 LCD プロジェクションシステムは、PDP、直視型 LCD に代表される薄型大画面 TV はもとより、従来の3板式 LCD プロジェクションシステムに比べ光学系が簡単で低価格化が期待できると同時に、消費電力も小さいという特長を有している。昨今の地球環境の問題、すなわち消費電力、廃棄物処理およびリサイクルの観点から考えても本カラーグレーティング方式の大画面 TV は他方式に比べ優れていると考えられる。

キーワード

液晶ディスプレイ (LCD)、プロジェクション、リアプロジェクション TV、大画面 TV、回折格子

A Study on a New Video-image Projection System based on a Diffraction Grating Technology**

Yasuo Funazou

Abstract

A new projection system of the single-LC panel is described using a novel diffraction grating technology. Recently large high-resolution displays are in great demand, and flat TVs using PDP and direct viewing LCD are coming into the market. In order to spread widely as TV for the consumer market, it is necessary for TV makers to realize lower cost and lower power consumption in addition to improve image quality.

On the other hand, LCD projection for display with large screen size is well known to be inexpensive compared with the costs of PDP and direct viewing LCD. Moreover the image qualities such as brightness, resolution and so on have greatly developed to be watched with keenest interest. The conventional LCD projection however uses small three LCD panels and the structure of the optical system is complex and expensive because the white light from lamp is separated into three primary colors to introduce three LCD panels and then is recombined to be projected by lens. Even this conventional LCD projection is thought to be insufficient in cost for wide spread of large screen TV as consumer use.

In this paper, considering the above situation, a new projection system is proposed with a novel diffraction grating device for color separation; a simple optical system can be realized by this novel

* Doctor's Thesis, Department of Information Processing, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT0361210, Sep. 22, 2005.

diffraction grating device and then LCD projection “Color Grating Method” is constructed with single LCD panel.

A diffraction grating device can make a spectrum of light and has been used as a spectroscope. Especially the reflection grating device of blaze type has a large advantage for LCD projection from the point of view of concentrating the diffraction light into the light with a certain diffraction order, the high efficiency of reflection, and good reliabilities on heat- and light-resistance. However two subjects still exist to apply the diffraction grating to LCD projector; one is high diffraction efficiency over visible light region (400~700nm), and second is the optimization of parameters of the device and angles of incident and diffracted lights.

In the first place, a diffraction grating device is simulated by supercomputer to design and to optimize the parameters with “boundary element method” which has been used to analyze a phenomenon occurred between two media. As a result of the simulation, the high efficiency of about 80% can be obtained over the visible light region. A diffraction grating device is manufactured actually for trial to confirm the detailed size of parameters of the device obtained by the above simulation.

Second, a simple optical system of polarization converter is developed by using a new prism-array, which consists of several small prisms. The prism-array combines two orthogonal polarized lights, therefore this optical system can utilize efficiently luminosity of a light source.

The 40-inch LCD rear-projection display based on these technologies realizes the images with the brightness of 400cd/m^2 , horizontal resolution of 600TV-lines, and the power consumption of 200W. The LCD projection system using diffraction grating technology is thought to be superior to the other displays with large screen from the point of views of lower cost and lower power consumption.

Key words: LCD, Projection, Diffraction Grating, Large Screen TV

目次

1	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	ディスプレイの応用展開	3
1.3	LCD プロジェクタの現状	7
1.4	プロジェクション方式の今後の動向と大画面TV	9
2	カラーグレーティング方式	13
2.1	はじめに	13
2.2	カラーグレーティング方式	14
3	回折格子の設計と製作	19
3.1	はじめに	19
3.2	回折格子の設計とシミュレーション	20
3.3	回折格子の最適化設計	22
3.4	ブレース角と頂角の最適化	26
3.5	回折格子の製作	32
4	照明，投写光学系の開発とプロジェクションシステムの試作，評価	35
4.1	はじめに	35
4.1	LCD パネル	36
4.3	プリズムアレイ方式照明光学系	37
4.4	投写レンズ	40
4.5	カラーグレーティング方式プロジェクションTV	42
5	結論	45
	謝辞	46
	参考文献	47
	研究業績	50

図目次

1	ディスプレイの応用展開	3
2	TV画面サイズの変遷	4
3	ディスプレイ応用商品市場規模予測	5
4	大画面TVの価格(実売)予想	6
5	3板ダイクロイックプリズム方式光学系	7
6	メタルハライドランプ, リフレクタと分光特性	8
7	カラーグレーティング方式の原理図	14
8	回折格子の断面図	14
9	従来の単板LCD方式の原理	15
10	3板ダイクロイックプリズム方式の原理	16
11	回折格子設計パラメータ(1)	21
12	偏光による回折効率の特性	24
13	回折格子設計パラメータ(2)	24
14	頂角による回折効率の依存性(P, S波平均)	27
15	頂角 84° 87° 90° での回折効率(P, S波平均)比較	27
16	頂角 75° 80° 85° 90° でのP波の回折効率比較	28
17	各ブレース角における回折効率(P, S波平均)	29
18	各ブレース角におけるP波の回折効率	30
19	回折格子のシミュレーション結果(P波)	31
20	レプリカ作成フロー図	32
21	レプリカの断面測定	33
22	LCDパネルとマイクロレンズ	36
23	LCDプロジェクションにおけるP, S偏光波有効利用の概念	37
24	プリズムアレイの原理	38
25	光学エンジン“PEGASAS”の構成図	39
26	投写レンズの周辺光量比	40
27	リアプロTV概略構成図	42
28	光学エンジン(PEGASAS)とキーコンポーネント	43
29	色再現範囲	44

表目次

1	40インチクラスの大画面TVの比較	10
2	頂角別回折効率の平均値	26
3	頂角90°固定でブレイズ角を変化させた時の回折効率	29
4	回折格子の仕様	31
5	LCDパネルの仕様	36
6	投写レンズ仕様	41
7	リアプロTV仕様・性能	43

写真目次

1 試作レプリカ	33
2 カラーグレーティング方式40インチリアプロTV	44

第 1 章 序論

1.1 はじめに

情報化社会到来と言われて既に久しい .10 年前に比べてビジネスにおいては勿論のこと，日常の生活においても，我々は非常に多くの情報を入手しながら活動するようになってきている．言い換えると今日では多くの情報を入手しないと生活できない社会になりつつある．我々はいろいろな情報のうち 80% 以上は視覚によって得ている．しかも我々は，時々刻々変化する視覚情報を，時には場所や時間を選ばないで入手する必要に迫られているのである．この視覚情報を我々に伝えてくれるのが電子情報ディスプレイであり，これらのニーズに対応する各種ディスプレイの研究開発が近年活発になって来ている．

1970 年代においても，潜在的に上記のニーズは存在したかもしれないが，電子情報ディスプレイを提供できる有効な手段は CRT(Cathode Ray Tube)しか存在しなかったため十分対応できなかった．それでも CRT は完成度の高い非常に優れたデバイスであったので，世の中のニーズに応えるため，表示情報量の拡大に努め，白黒 TV からカラーTV，更には HDTV 対応の CRT まで進化してきた．また数インチサイズの小型から 36 インチの大型サイズまでその範疇を拡大し，奥行き，重量などの課題を残しながらも世の中のニーズに応えてきた．36 インチ以上の大型化に関しては，CRT 自体が真空管であり，電子ビームの発生，偏向に要する空間という構造上の制限により重量の課題をクリアできなかったため，量産化されることはなかった．

1980 年代になると液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display:LCD) という新しいディスプレイ・デバイスの開発が急速に進展してきた．当初は我々の要求する情報の代表である TV 映像を供給するのは困難と考えられていたが，性

能の優れた液晶材料の研究開発が進むと共に、TFT (Thin Film Transistor) によるアクティブマトリクス化により 1990 年代に飛躍的にコントラスト比等の画像性能が向上した。LCD の成長カーブはしばしば “ 3 年で性能が 4 倍になった ” と端的に表現されている [1]。これは LCD パネルを製造するための “ マザーガラス ” のサイズが 3 年で 1.8 倍に、LCD のスクリーンサイズも 3 年で 1.35 倍に大きくなっており、より大型サイズの製造を可能にしていること、更には解像度が 3 年で 1.7 倍に増大しているためである。この 3 つの因子を掛け合わせると性能が 4 倍になることを意味している。

LCD の大きな特徴は、非発光型であることと、1 インチ以下のミニサイズから 100 インチクラスの大画面ディスプレイを供給できる点にある。小型化に関しては、LCD の製造が LSI の製造に極めて近いことから製造が容易であり、大型化に関しても LCD に外部から光を入射しその透過光または反射光をレンズ等で拡大することで容易に大画面ディスプレイが可能になる。

また一方、大画面ディスプレイと言え、先駆者は PDP (Plasma Display Panel) であり、開発者は低価格化に取り組み、大画面 TV を LCD よりも早く 2001 年頃から市場に出している [2]。しかし PDP だけでは世の中の要求する全てのサイズに対応することは不可能で、40 インチから 60 インチクラスの大画面 TV の分野に限られている。更に消費電力が CRT や LCD に比べ大きいことから、特に地球環境という観点からも昨今では電力の低減という課題の解決を迫られている。

1.2 ディスプレイの応用展開

本研究は投写型 LCD(プロジェクション方式)ディスプレイの新規技術の研究開発に関するものであるが、本題に入る前にこの研究開発の背景にある情報化社会においてディスプレイはどう進化して来たのか、また世の中のニーズは具体的にどのような要求をしているかを述べる。

先ずディスプレイを必要とする応用分野について述べる(図1 [3])。応用分野としてはこの図のように3つの分野への展開が進行しつつあると言える。1つは映像のリアリティを追求する大画面映像の世界であり、市場の最も大きな大画面 TV や大画面業務用ディスプレイの分野である。2つめは高精細さを必要とする業務用及びパーソナル用途のモニター用ディスプレイの世界である。3つめは CRT では困難であった携帯や PDA 用ディスプレイの分野であり、これらの3分野の大半は LCD で可能になったと言っても過言ではない。

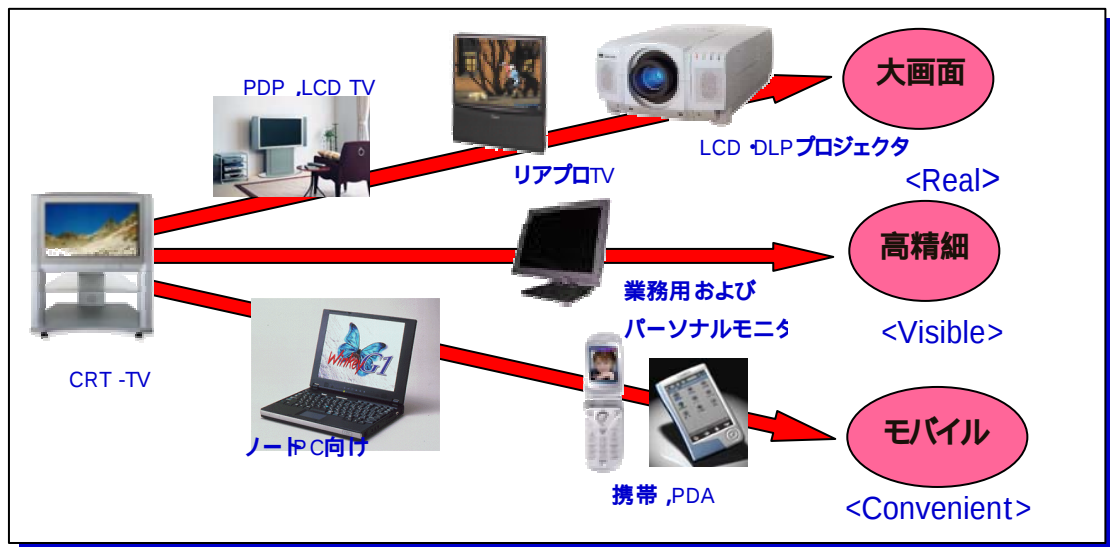


図1 ディスプレイの応用展開[3]

－TV画面サイズの変遷－



図2 TV画面サイズの変遷

最も重要な分野であるTVの大画面化が時代と共に進んだ様子を図2に示す。大画面化による情報量の増大というニーズにはカラーTV放送やデジタルTV放送の開始に同期して大画面化が進んできたことが分かる。特にデジタルTV放送開始を契機に高臨場感の得られる大画面TVへのニーズが顕著になって来た。2004年には新規にTVを購入しようとするユーザは40インチクラスの大画面TVを第1候補にあげていると言われている。

図1の市場の大きい“大画面分野”では先ず2001年から大画面TV用としてPDPが先行し、LCDが20インチクラスの中型からTV市場に参入し、2004年にはPDPと同等サイズの60インチまで開発が進んでいる。また2004年には第3候補としてLCDやDLPを利用したプロジェクションTV（以降リアプロTVと記述）が脚光を集めるようになって来た。

TVの市場が今後どのように増大して行くかを知ることは、新規リアプロTVの研究開発に重要である（図3[4]）。この図にはTV以外の3つのディスプレイの応用分野の市場推移も合わせて示してある。これらの分野は一般の予想に反して規模も小さく、金額ベースでの増大はあまり期待できない。これは、台数は増加するが、単価の低価格化が進むと考えられるためである。それに反してTVの分野では市場規模は6年で約3倍の6兆円に増大すると予想されている。従来のCRT-TVにおいては今後増大を見込めないが、金額の高い大

画面 TV の市場が順調に立ち上がり , 市場拡大に大きく貢献すると考えられるからである . 特に日本ではこの傾向は強く , LCD と PDP に代表されるフラット TV は 2003 年中旬には CRT-TV に金額ベースで追いついており , 2005 年には台数ベースでも追いつき追い越すと言われている .

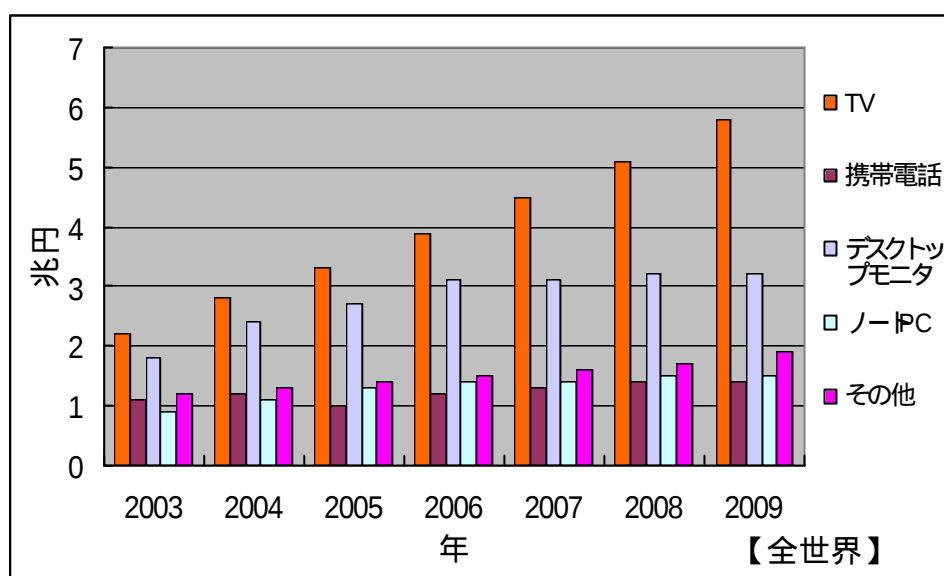


図 3 ディスプレイ応用商品市場規模予測 [4]

このように大画面 TV の市場規模は大きく成長すると予想されており , どの方式の大画面 TV が主流になるのかが , 昨今のエレクトロニクス業界の大きな関心事である . 2004 年になって LCD リアプロ方式が大画面 TV の候補として認知されるようになって来た背景には , 本来の低価格に加えて , 画質が LCD や PDP に匹敵するまでになって来たためである . このリアプロ TV の価格が如何に有利であるかを図 4 に示す [5][6] . この図から大画面 TV が本格的に普及すると思われる 2006 年以降において 40 インチ以上の大画面では非常に有利であることが分かる . ところで大画面 TV の普及を価格の点から考えると , もっと顕著なことがこの分野で起こっている . 1990 年に入るとすでに低価格のリアプロ TV は小型 CRT を用いた所謂 3 管方式を採用して北米で既に 100 万台の市場を形成し , 現在では 400 万台の大市場を形成するに至っている [7][8][9] . これはまさしくユーザが低価格で且つ臨場感

のある大画面 TV を要望していたことを証明している。しかしこの 3 管方式は低価格だけが利点で、明るさ、解像度等の画質は不十分であり、昨今の
大画面で且つ高精細という要求を満足することはできない。3 管方式にお
いては小型 CRT の輝度限界（蛍光体の焼き付き）と解像度の劣化、更には
3 本の電子ビームのコンバージェンス（電子ビームの収束）が解像度の限
界を決めている。小型 CRT に代えて小型 LCD を利用したプロジェクション
ディスプレイは、1990 年に入るとまずフロントプロジェクタとして業務用
として普及し始めた。このフロントプロジェクタの特長は高解像度と高輝
度であり、当然のようにリアプロ TV への展開が始まって注目を集めるに至
ったということである。

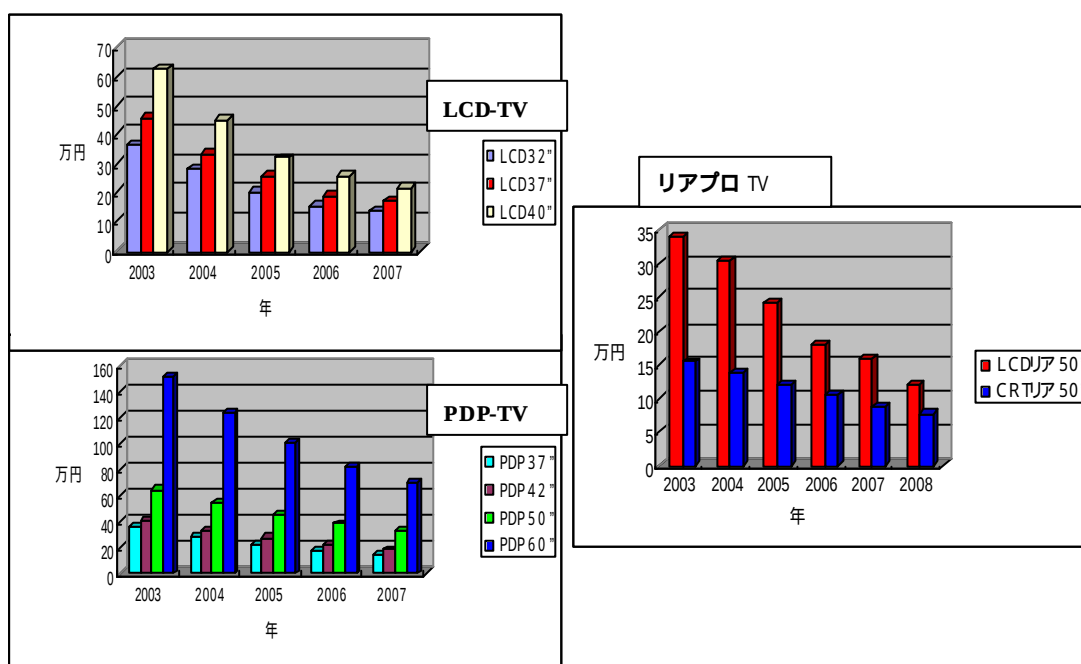


図 4 大画面 TV の価格(実売)予想[5][6]

1.3 LCD プロジェクタの現状

ここでLCDを利用したリアプロTVと同じ基盤技術に基づいている前面スクリーンに投写するフロントプロジェクタ方式について言及する．この方式は3枚の小型LCDを利用した方式が主流であり，ハンドリングが容易でしかもPDPや直視型LCDでは実現不可能な大画面を高精細に表示可能であり，消費電力の観点からも優れた大画面ディスプレイと評価されている[10][11][12]．

1990年に入るとTFT(Thin Film Transistor)技術の進化と信頼性の高い高温ポリシリコン基板を用いたLCDパネルの開発が進み，パネルの小型化，高精細化が一層進んだ．このLCDパネルを用いたプロジェクションディスプレイ（一般にプロジェクタと呼ばれる）は容易に大画面映像を実現できるためプレゼンテーション等の業務用として市場を形成してきた．いくつかの方式が開発されたがここでは現在主流となっている“3板ダイクロイックプリズム方式”を紹介する．なお，筆者らは1989年業界に先駆けて“3板ダイクロイックミラー方式”を開発した（プリズムの代わりに2枚のダイクロイックミラーを利用する方式）．

3板ダイクロイックプリズム方式においては，R（赤）映像，G（緑）映像，B（青）映像をそれぞれ受け持つ3枚のLCDパネルとR,G,B光を合成するためのプリズム光学系を用いる（図5）．

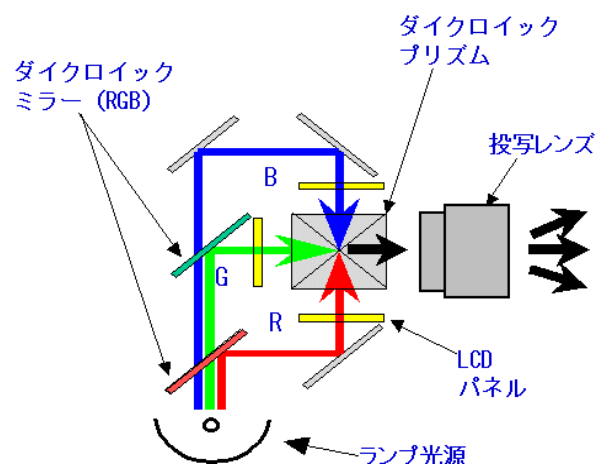


図5 3板ダイクロイックプリズム方式光学系

図において R,G,B は LCD パネルで各々 R 映像，G 映像，B 映像信号がこれらのパネルに印加される．ランプからは白色光が出射され，先ず 1 枚目のダイクロイックミラーでは R 光が反射され R 用 LCD に入射するが G 光と B 光は透過する．次に透過した G 光は次のダイクロイックミラーで反射され G 用 LCD に入射する．残った B 光も B 用 LCD パネルに入射する．このようにして 3 枚の LCD パネルを透過したダイクロイックプリズムに入射する．このプリズムは 4 つのプリズムの端面が精度良く光学的に接着されており，各々の端面には波長選択性をもった膜が形成されている．すなわち G 光はこれらの膜に影響されることなく透過し投写レンズに入る．R 光及び B 光は膜で反射され投写レンズに入り，結果として R,G,B の映像信号で変調された光は合成され投写レンズで拡大投影される．3 枚の LCD パネルの位置合せは大変重要で，この精度が悪いと得られた投影画像に色ずれを生じる．この光学系は高価なダイクロイックプリズムを必要とするが，光学系が比較的コンパクトに収まるという利点を持っている．

もう 1 つの重要な光学部品はランプである．ランプはできる限り点光源で明るく，且つ R,G,B の光り成分を適切な割合で含んでいることが望まれる．得られる画像の白色色温度が 9000K ~ 10000K が好まれており，この色温度を得るため特定波長の光をカットしなければならないケースにおいては，ランプの利用効率が低下する．現在では“高圧メタルハライドランプ”が最も性能が良く，このランプとリフレクター（反射鏡）が利用されている（図 6）．

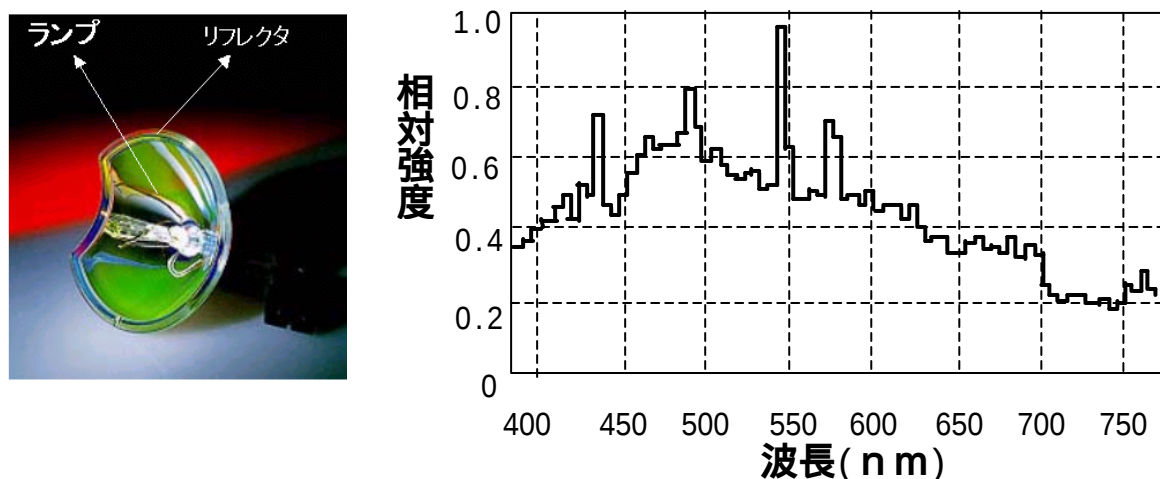


図 6 メタルハライドランプ，リフレクタと分光特性

1.4 プロジェクション方式の今後の動向と大画面 TV

昨今では上述の 3 板ダイクロイックプリズム方式のプロジェクタを用いると容易に大画面ディスプレイが得られる事が世の中で認知されている。開発当初は大画面であるが暗いとか解像度が十分でない等の欠点があったが、LCD パネルの高精細化とランプの高輝度化、更には照明光学系の改善により、今では画質的に LCD や PDP による薄型大画面 TV と同等あるいはそれ以上にまで進化しつつあり、第 3 の大画面 TV としての注目を集めるに至っている。

しかしながらフロントプロジェクタは業務用途に用いられた経緯から複雑構成で光学部品が多く使用されており、今後リアプロ TV に展開し本格的な民生用の大画面 TV で優位性を確立するためには、部品点数の削減や光学構成の簡略化が必須である。すなわち LCD パネルを 3 枚使用しており、更に光を 3 原色に分離して LCD パネルに照射するためのダイクロイックミラー、LCD パネル出射後の光を合成するためのダイクロイックプリズム等の光学部品を多数必要とする。最も単純構造という観点からは、赤、青、緑の画像を受け持つ 3 枚の LCD パネルを 1 枚にする方法が提案されている[13]。この代表的な方式の 1 つに、直視型 LCD と同様に、赤、青、緑の光吸収式のカラーフィルタを装着した 1 枚の LCD パネルを用いた単板方式プロジェクションがある。しかし、カラーフィルタによる光の吸収が大きく、スクリーン輝度が 1/3 に減衰するという大きな欠点があった。この輝度劣化を補うため光源のランプ光量を増加させる方法が考えられるが、フィルタの耐熱・耐光性の問題が発生すると同時に消費電力の点からも好ましくない。

また近年 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術を応用したマイクロミラーからなる反射型表示デバイスである DMD (Digital Micro-mirrors Device) を用いたプロジェクタが市場に出ている。DMD 素子はその高速応答可能な特長を生かして、単板型の光学エンジンを構成することが可能であるが、DMD 素子 1 枚のコストが LCD 3 枚分にほぼ相当し、LCD を 3 枚使用する方式に対して絶対的なコスト優位性はない。また、DMD では R G B 三原色を時分割に順次表示するフィールドシーケンシャル方式を採用しているためカラーブレイク (急峻な眼球運動の際に三原色の分離が知覚される現象) という画質面における大きな課題がある。[14][15][16]。

次に，ここで第3の大画面TVとしてのリアプロTVとLCD-TV，PDP-TVとの差異について述べる．3つの方式の性能の差異は原理の違いによっている．PDP-TVは開発当初から大画面TVをターゲットにしており，印刷技術を基本にしているので大画面化に向いている（逆に30インチ以下の小型は困難である）．特長は蛍光体の自発光のため視覚的にはCRTに近い画像であり，動画特性に優れていることにある．しかし小さなセル内での放電・発光は効率が悪く消費電力に改善の余地が残されている．LCD-TVは小型・高精細を特長としており，従来は大型化に伴う歩留まり悪化の課題があり，コスト的に不利と考えられていた．しかしPC用ディスプレイで改善が進み，TV市場への展開のため大規模な設備投資によるコストダウンを行うと同時に，TFTの歩留まり改善に注力し，40インチ超も技術的に可能になって来ている．しかし，LCDの基本的な欠点である応答速度の悪さと視野角度は改善が進んでいるがPDPに劣る．輝度アップはバックライトの改善で比較的容易でありPDPに比べ優位である．

第3のリアプロTVは小型LCDと光学部品のアセンブリで低価格が期待でき且つメタルハライドランプの発光効率の良さに起因して，製造に際し設備投資が非常に少なく，消費電力も少ないという特長を有する．しかし光学系の占める空間が必要なためLCD-TVやPDP-TVのような薄型化は困難である．

表1 40インチクラスの大画面TVの比較

	リアプロTV	PDP-TV	LCD-TV
大画面サイズ	◎	◎	△
輝度	◎	△	◎
解像度	◎	△	◎
コントラスト	◎	△	◎
視野角・応答	○	◎	○
奥行き	△	○	○
消費電力	◎	△	○
コスト	◎	○	△
環境・リサイクル	◎	△	○

◎:良好・可能
○: ↓
△:
×:不可

表 1 は、今後家庭用大画面 TV として最も市場規模の大きいと思われる 40 インチクラスの大画面 TV の定性的な比較表である。この表から小型 LCD パネルを用いたリアプロ TV の優位性があると考え、欠点は奥行きであるが、LCD-TV や PDP-TV レベルの薄型化は困難としても、照明光学系の創意・改善によって近い将来 40 インチで奥行き 20cm が可能と思われる。一方、現実的な見地から LCD-TV、PDP-TV はディスプレイ本体の奥行きは 10～15cm であるが、スタンドは 20cm 以上必要であり、実用上はそれほど大きな差異はないと考える。

このような状況を考慮し、第 3 の大画面 TV であるリアプロ TV に注目し、今後の本格的な普及のために、構造がより簡単な新規な回折格子を利用した 40 インチ単板方式の LCD プロジェクションシステムを提案する(以降、カラーグレーティング方式と呼ぶ[17])。本方式のプロジェクションは、LCD パネルとカラー化の手段に利用される回折格子が空間的に分離されていることと、この素子自体が反射型で光の吸収がないため原理的に光利用効率が高く、しかも耐熱・耐光性に優れているなどの利点を有している。また昨今の LCD 技術の進展により、パネルの高精細化が一段と進み 1 枚のプロジェクション用小型 LCD パネルでも十分な解像度が得られるに到っている状況にあり、本方式に好都合な環境が形成されつつある。

上述のように 3 板式 LCD プロジェクションは本格的な民生用大画面 TV としては複雑な光学系にまだ課題があり、3 板方式に比べ優位にあるカラーグレーティング方式 LCD リアプロ TV が 3 板方式に取って代り市場に受け入れられる可能性は大いにあると考えられる。さらに、前方に設置されたスクリーンに投写するフロントプロジェクタにおいても、小型・軽量タイプにおいては従来の 3 板式 LCD プロジェクションシステムに比較して有用である。

大画面 TV の第 3 の候補として注目されるようになった LCD リアプロ TV は、LCD、PDP に比べ表 1 に示すように性能面で優位にあるが、カラーグレーティング方式により一層明確になると期待される。またもう 1 つの特長は、リアプロ TV 一般にも言えることであるが、製造時における設備投資額が少なく済むと言う点である。LCD-TV 用の大型の LCD パネル製造には 1,000 億円以上の巨額の設備投資が必要であり、PDP においても数 100 億円の投資が必要である。

一方，LCD リアプロ TV 用の LCD パネルのサイズは高々1 インチ程度であり，設備投資は桁違いに小さい．さらにスクリーンサイズの異なるリアプロ TV にも新たに大幅に設備を導入することなく対応できるのも大きな特長である．

次に消費電力について考えると，代表的な 42 インチ PDP-TV は 370W，37 インチ LCD-TV は 210W である．これに対し，後に述べるが本研究の 40 インチリアプロ TV は 200W であることが判明している．同じサイズに換算するとリアプロ TV の優位性が分かる．この大きな原因は光源に利用するランプの発光効率の良さが，PDP の発光効率や LCD 用のバックライトの効率より良いことに起因している．この電力の問題と合わせて，環境・リサイクルという観点からもリアプロ方式は他の方式に比べ優れている．リアプロ方式においては，主要な部品は 1 インチサイズの小型 LCD や小さな光学部品であり，他は樹脂製のスクリーン，ミラーや筐体で，リサイクルや廃棄が容易である．地球環境の観点からもリアプロ方式は優れており，このリアプロ方式の中でも本研究のカラーグレーティング方式は簡単な光学系であるという利点を持つと考える[18]．

このカラーグレーティング方式実現のため，本研究では以下の検討を行った．

- 1．高効率な反射型回折格子のコンピュータシミュレーションによる最適設計
- 2．高効率な照明および投写光学系の開発
- 3．40 インチ以上の大画面リアプロ TV を目指し，上記 1．2．の開発技術を搭載した 40 インチリアプロ TV の開発，検証

本論では，先ずカラーグレーティング方式とそのキーコンポーネントとなる回折格子の研究結果を述べる共に，上記のカラーグレーティング方式プロジェクションディスプレイ実現のために行った研究結果に関して詳細に述べる．

第 2 章 カラーグレーティング方式

2.1 はじめに

前章で述べたフロントタイプの LCD プロジェクタは、小型 LCD を用いて 50 インチ～数百インチの大画面表示を実現するのに有効な手段であるが、一方で大画面テレビを指向したリアプロ方式への適応にも有効である。リアプロ TV は、背面透過型のスクリーンを用い、光学エンジン部からの映像を背面投射し、従来の CRT では不可能である 40 インチ以上の大画面を実現するのに有効な技術である。

リアプロ TV は高輝度 CRT をベースに R G B 三原色使用したものが主流であるが、小型 LCD ベースの光学エンジンを搭載することにより、本体の小型、薄型化を図ることが可能である。しかしながら、前述のようなカラーフィルタ方式単板 LCD 方式や DMD デバイスを用いたものは、それぞれ輝度やデバイスコストの課題があるため、新たな技術開発のブレークスルーが必要である。

本章では、簡単な光学構成で、これらの課題を克服するために開発したカラーグレーティング方式の原理、技術開発内容について述べる。

2.2 カラーグレーティング方式

カラーグレーティング方式による新規なプロジェクションの原理を図7に示す[17].なお,本論文では光源であるランプとこれから出射される光がLCDパネルに入射するまでの光学系を「照明光学系」と称し,この照明光学系とLCDパネル,投写レンズを含む光学システムを「光学エンジン」と呼ぶ.一般に白色光が回折格子により分光されることはよく知られている.本方式はこの原理を利用し白色光を3原色に分光して,1枚のLCDパネルに入射させフルカラー画像を再生する新規な単板方式である.ランプから放射された平行度の高い白色光は回折素子に入射した後,回折効果により赤(R),青(B),緑(G)各色に分光され,各々の光は各々異なった方向に反射する(図8).こ

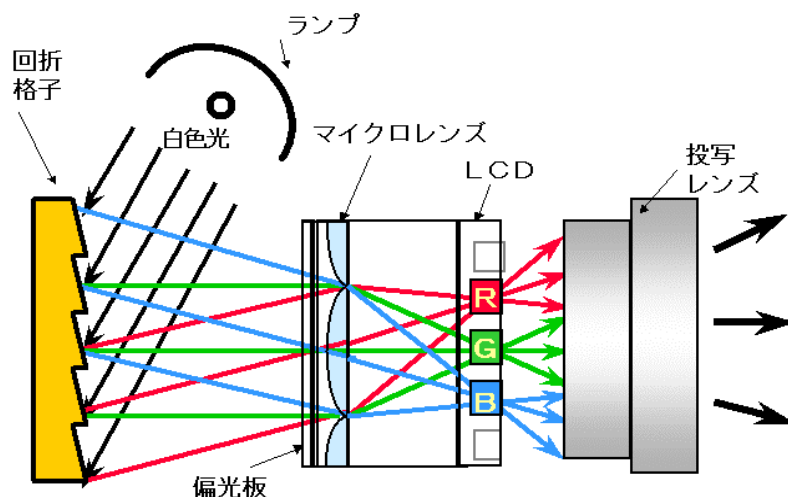


図7 カラーグレーティング方式の原理図

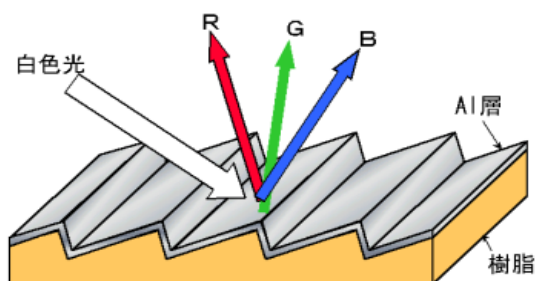


図8 回折格子の断面図

これらの光は、その後 LCD パネル入射側に装着されたマイクロレンズ群に入射する（1つのマイクロレンズには3つの LCD 画素が対応している）。R、G、B の光はマイクロレンズへの入射角度が異なるため異なった位置の LCD の画素に集光する。図7でRと表示された LCD の画素には赤の光のみが入射し、G 表示の画素には緑の光のみが入射し、B 表示の画素には青の光のみが入射する。この様に本方式では LCD の異なる画素に3原色 R、G、B の光が振り分けられるため1枚の LCD でフルカラー画像が再生できる。例えば、赤（R）を再生するときにはRと表示された画素群のみ光を透過させるように LCD を制御すればよい。

一方、従来の光吸収式カラーフィルタを用いた単板方式の光学エンジンにおいては、白色光が各々 R、G、B 用のカラーフィルタを装着した画素に入射しており、各画素のカラーフィルタは R、G、B のいずれか単色光のみが透過する結果、1/3 に光が減衰するという基本的な欠点がある（図9）。すなわちこの方式では明るい画面は得られず、昨今の明るさが第1優先のプロジェクションシステムとしての採用は困難と思われる[13]。

また上記の光吸収式のカラーフィルタを用いない単板式光学エンジンとして、マイクロレンズ付 LCD パネルの入射側に3枚のダイクロイックミラーを設置し、R、G、B 3 原色の光を各々異なった角度で LCD パネルに入射させることによるカラー再生法が提案されている[21][22][23]。この方式はカラー

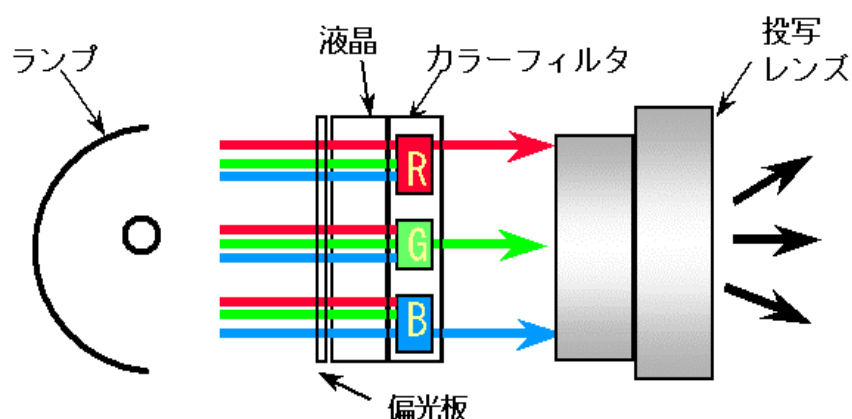


図9 従来の単板 LCD 方式の原理

フィルタによる大幅な光の損失が原理上発生しないという利点があるが、3枚の高価なダイクロイックミラーが必要な上に、3枚のミラーの設計角度からの少しの設置誤差により輝度変化や色純度劣化が発生する可能性が大きいという課題がある。

もう一方の従来方式である3板方式はすでに業務用途のプロジェクタとして市場に出ている。図10に示すように、この方式の光学エンジンでは、まず2枚のダイクロイックミラーでR、G、Bに分離した3原色の光を3枚のLCDパネルに照射し、R、G、Bの映像信号でそれぞれ変調した後に、ダイクロイックプリズムにて1つに合成し、投写レンズに導く。この方式では比較的光の利用効率がよく明るい画面が得られるので、現在ではプロジェクション方式の主流になっている[10][11][12]。しかしながら、高価な部品である3枚のLCDパネルと色分離合成の光学系には6個の光学部品（ダイクロイックプリズム及びミラー）を必要とし、大画面TV用途としては価格の点から課題が残っている。

また最近、回折を利用したホログラムカラーフィルタを反射型LCDの表面に貼り付けた単板方式が報告されている[22]。この方式は透過型ホログラムカラーフィルタを用い回折と集光作用を併せ持たせることにより、単板方式を実現させている。反射型LCDは高精細化に有利とされており、ハイビジョン用途への適応が考えられるが、一方でリアプロTVのニーズを考えた場合、

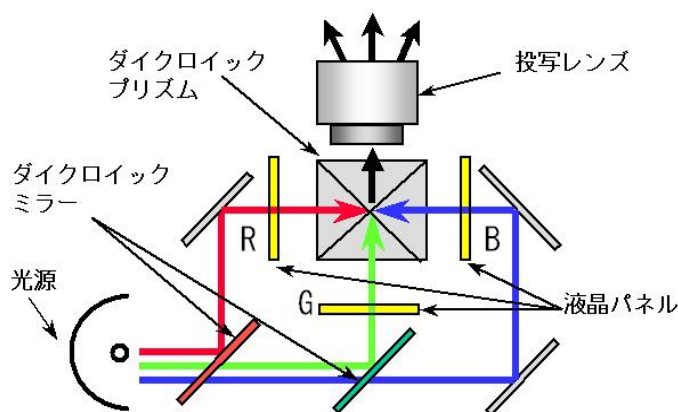


図10 3板ダイクロイックプリズム方式の原理

反射型光学系特有の光学部品を要するなどコスト面ではまだ透過型 LCD の採用が有利である。また反射型 LCD の光学システムは入射光が 2 回フィルタを透過するため光吸収が大きく、広い波長領域で高効率の回折光を得るのが難しいと予想される。この透過型ホログラムカラーフィルタの光利用効率は 40% 以上と報告されているが、プロジェクションシステム全体から考えると十分ではない。さらに、フィルタが透過型になるため光の耐熱性等に課題が残っている。

このように、光学エンジンが原理的により簡単で、光利用効率も高いものが求められている。このような特長を有するプロジェクションシステムを実現するために、下記の研究・開発を行った。

光利用効率のより高い回折格子のシミュレーション設計と製作。

新規プリズムアレイ光学系、投写レンズの開発と、前記技術を用いたディスプレイシステムの試作、評価。

これらについて以下に詳細に述べる。

第 3 章 回折格子の設計と製作

3.1 はじめに

カラーグレーティング方式 LCD プロジェクションの特長は、光学系が簡単であることと、単板 LCD 方式でありながら高い光利用効率を達成できることである。これらを実現するためのキーコンポーネントが回折格子である。本方式における回折格子の役割は、光源白色光を R G B 三原色に分離し、LCD パネルに各色光を照射することである。前述の特長を実現するために、回折格子には以下の要件が必要である。

R G B 3 原色を含む全ての可視域において高い回折効率を有すること。

LCD に対して有効な光照射角度に R G B 光を分離すること。

製造可能な技術を確立すること。

回折格子は、分光器など光学機器への応用は広く知られており[25]、ディスプレイ向けの色分離合成用途に過去にも検討が為されている[26][27]。しかし、回折格子をプロジェクションディスプレイの分光素子として利用するためには新たに厳密な回折効率シミュレーションによる設計が必要であるため、これまでは民生用 TV を志向した回折格子について、設計・検証されることは無かった。

本章では、上記の要件を満たすための回折格子の設計手法、及び設計仕様に基づく試作方法について述べる。

3.2 回折格子の設計とシミュレーション

本来、回折格子は光の回折を利用して光のスペクトルを得る分光素子で、古くから主に分光器に用いられてきた[25]。反射型と透過型の回折格子があるが、ここでは広い波長領域で光の高い利用効率が期待できる点から金属膜で形成される反射型回折格子を選んだ。また、反射型は市販の LCD パネルの R, G, B 画素に適合できる設計が可能であるが、透過型では設計の自由度が極めて小さい。従来の回折格子は特定の波長を対象とし、また入射光の方向に 1 次の回折光が戻るリトロ配置での回折効率の最大化が図られていた。回折格子のプロジェクションディスプレイへの応用を考えた場合、可視光領域全域 (400 ~ 700nm) における高い回折効率が要求されると共に、LCD パネル、照明光学系等の配置を考慮して光入射角度も含めて最適化する必要がある。そこで、今回はスーパーコンピュータを用いて投写型ディスプレイに最適な回折格子のパラメータを決定した。

回折格子の断面形状としては、矩形波状、正弦波状、鋸波状(ブレ - ズタイプ)などがあるが、前 2 者は凹凸の 1 サイクルが線形対称であり、特定の回折次数への回折光の集中が困難である。これに対してブレ - ズタイプは非対称形であるため、回折光を特定の次数に集中できるので光を有効に利用できる。このため反射型ブレ - ズタイプの回折格子を採用し、その回折効率向上のための最適設計を行った。以下に回折格子の光利用効率を最大にするための回折効率 (1 次回折光の反射率) のシミュレーション手法について述べる。

図 11 に示すように格子ピッチ d の回折格子へ波長 λ の光が入射角 ϕ で入射し、その回折角を ψ とすると

$$m\lambda = d(\sin\phi + \sin\psi) \quad (1)$$

の関係式が成り立つ。ここで m は回折次数である。高い回折効率を得る場合は一次回折光 ($m=1$) を用いる[28][29]。

(1) 式は光の回折角が光波長に依存することを示し、この関係式により R G B 各波長の出射角を決定する。

また、図 11 中の θ_B はブレイズ角、 θ_T は頂角と呼ばれ、回折格子の回折効率を決定する上で重要なパラメータである。

次節ではまず回折効率の最大解を求める手法について述べる．

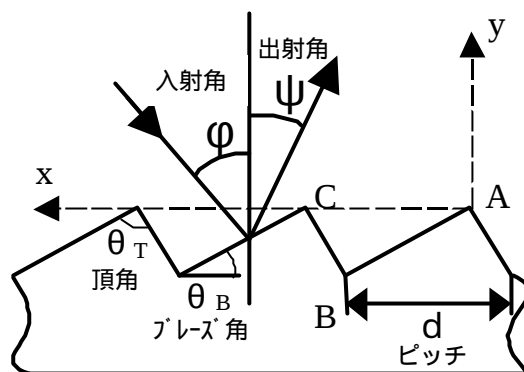


図 11 回折格子設計パラメータ(1)

3.3 回折格子の最適化設計

回折光の概略設計の計算手法としては、キルヒホッフの法則が良く知られている[30]。

x y 軸を図 11 の様に定めたとき、式(2)の各パラメータは以下の様に定義される。回折格子のブレース傾斜面を決定する直線 AB, BC を各々

$$y = -cx$$

$$y = c'(x - d)$$

とする。ここで d は回折格子のピッチである。すると、点 B の x 座標は

$$x = dc' / (c + c')$$

となり、これを u と定義する。一方 μ , γ は各々

$$\mu = \sin \varphi + \sin \psi = n\lambda / d$$

$$\gamma = \cos \varphi + \cos \psi$$

を表すものとする。この式は比較的単純であるので、表計算ソフトウェアを利用してブレース角と回折溝ピッチをパラメータとして光強度が最大になるような条件を求め、回折格子形状の絞込みを行った。

$$\text{回折光強度} = \lambda^2 \left[\sin \frac{\pi(\mu - c\gamma)}{\lambda} \right]^2 \cdot \left[\frac{(\mu^2 + \gamma^2) \cdot (c + c')}{(\mu - c\gamma) \cdot (\mu + c'\gamma)} \right]^2 \quad (2)$$

u : 座標

λ : 波長

$$\mu = \sin \varphi + \sin \psi = n\lambda / d, \gamma = \cos \varphi + \cos \psi$$

φ : 入射角, ψ : 出射角, d : グレーティング溝ピッチ

この理論式では、格子ピッチが大きい場合にはほぼ一致するが、ブレース反射面における回折のみが考慮され、回折格子の頂点や谷部など面端部の回折特性が考慮されないため回折格子の溝が狭いピッチになるに従って実測値と一致しなくなる。また、振幅が光入射面に垂直（回折格子溝に平行）な光（S 偏光）と、振幅が入射面に平行（回折格子溝に垂直）な光（P 偏光）の 2 種類の光があるが、反射面の誘電率を考慮していないため回折効率の偏光依存性に対する解析が不可能であるため、格子形状決定の概略設計に留めた。

新規に詳細な回折格子開発のための設計としては、2つの媒質間で起こる現象を解析するときに用いられる境界要素法（Boundary Element Methods）がある。この手法により厳密な回折効率のシミュレーションが可能となる。

回折格子のx方向にピッチdの周期的構造をもつ比誘電率εの金属格子表面の境界領域における電磁波を考えた場合、ヘルムホルツ方程式から（3）式が成り立つ。

$$\nabla^2 \varphi + k^2 \varphi = 0 \quad (3)$$

ここで、φは光波、kは波数である。この関係式に2媒質境界要素法を適用することで回折光強度（4）式が導出される。（4）式において右辺第1項は回折格子のピッチ方向に起因する項であり、第2項は法線方向の境界に関する項である。

この（4）式より光振幅関数で表された光波φの振幅が光入射面に垂直（回折格子溝に平行）な光（S偏光）と、光波φの振幅が入射面に平行（回折格子溝に垂直）な光（P偏光）それぞれに対する回折光強度が求められる[31]。

$$n\text{次の反射回折光強度} = \frac{X_n}{X_0} \left| \int_0^d g_n(x) \varphi(x, y) dx - \delta n_0 \exp(-j X_0 |y|) \right|^2 \quad (4)$$

$$\chi_n = \sqrt{k^2 \varepsilon - \beta_n^2}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \times \sqrt{\varepsilon}$$

$$\beta_n = \sqrt{\varepsilon k \sin \theta + 2n\pi d}$$

$$g_n(x) = \frac{1}{\sqrt{d}} \exp(-j \beta_n x)$$

x, y : 座標上の位置

k: 波数, n: 回折次数, ε : 誘電率

コンピュータシミュレーションの結果、図12の様にP偏光を利用することで本方式において高い光利用効率を得られることが確かめられた。設計パラメータは以下の通りである（図13）。

光源からの白色光の入射角：φ RGB 各色の主波長：λ_R, λ_G, λ_B

RGB 各色の主波長出射角： ψ_R, ψ_G, ψ_B 回折格子の溝ピッチ： d

溝頂角： θ_T LCD パネルの光分散角： α (図 13 参照)

グレーティングの溝形状のブレイズ角 (緩斜面の角)： θ_B

回折効率 (%)

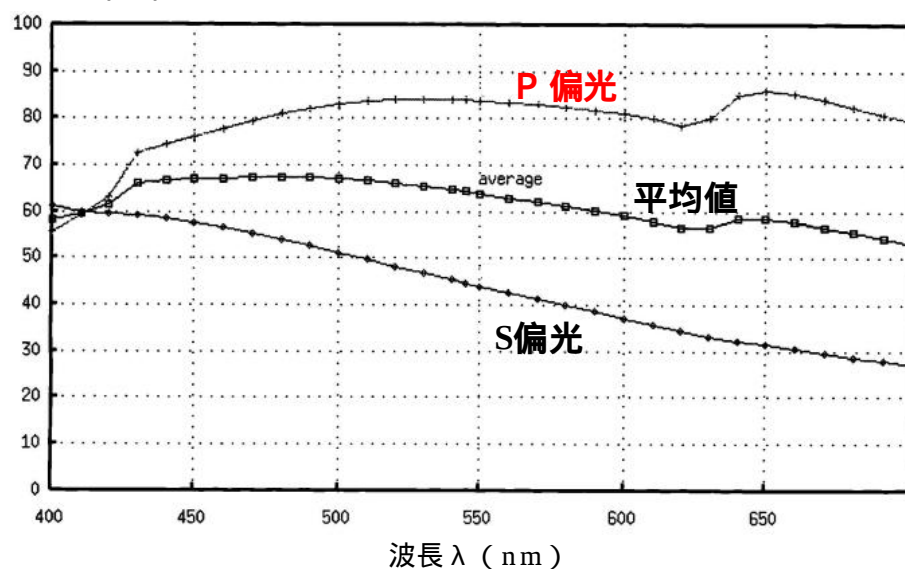


図 12 偏光による回折効率の特性

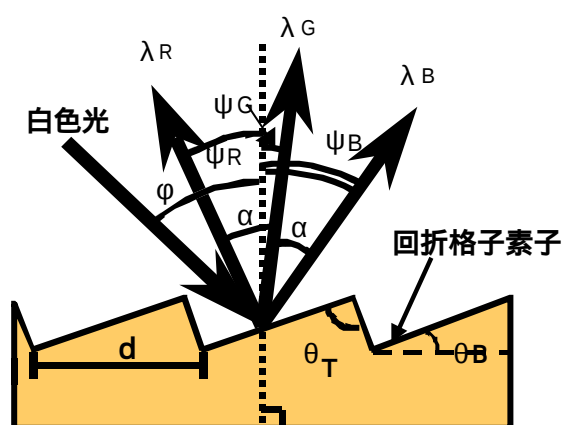


図 13 回折格子設計パラメータ(2)

また回折光の入射角 ϕ と出射角 ψ はその波長 λ に対しては，以下の式で表

される．

$$\sin \varphi + \sin \psi = n \lambda / d \quad (+ 1 \text{次光の場合}, n = 1) \quad (5)$$

はじめに，光学的な基本仕様を決定しておく必要がある．即ち，LCD パネルの分散角 α と R G B 各色の主波長出射角 ψ_R, ψ_G, ψ_B と分散角 α の関係は

$$\alpha = | \psi_B - \psi_G | = | \psi_G - \psi_R | \quad (6)$$

となる（図 13 参照）．ここでは，R, G, B 各色の主波長 $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ は LCD パネル設計仕様より，それぞれ 638 nm, 545 nm, 453 nm とした．分散角 α は，LCD パネル画素とマイクロレンズの光学特性で決定され， $\alpha = 7.5^\circ$ の LCD パネルを採用した．(5) 式の R, G, B 波長に対する 3 つの式，(6) 式とさらに入出射光と光学部品との干渉等を考慮し，

$$d = 710 \text{ nm}, \quad \varphi = 56^\circ, \quad \psi_R = 4.0^\circ, \quad \psi_G = -3.5^\circ, \quad \psi_B = -11^\circ$$

と決定した．これらの情報に基づいて，(3) 式において回折光強度が可視光領域全体にわたり均一に強くなるように，スーパーコンピュータを用いて， θ_B, θ_T をパラメータとして最適化の条件を探した．

これらの最適化の詳細について以下に述べる．

3.4 ブレーズ角と頂角の最適化

キルヒホッフの理論式からブレーズ角 $\theta_B = 20 \sim 25^\circ$, 頂角 $\theta_T = 70 \sim 90^\circ$ の範囲で回折効率が高くなる傾向が得られたのでこの範囲内で最も回折効率の良い形状を境界要素法のシミュレーションにより求めた。

まず $\theta_B = 20^\circ$ に固定し, 頂角を変化させた場合の回折効率をシミュレーションした。

色再現上考慮すべき主な波長である $\lambda = 420, 430, 470, 545, 620, 700\text{nm}$ に対する各波長の回折効率平均値を表 2 に, それをグラフにしたものを図 14 に示す。ここでの回折効率は P 波, S 波の平均値を示す。

表 2 頂角別回折効率の平均値

頂角 $\theta_{TP} (^\circ)$	回折効率の平均 (%) (6 波長, P/S 波の平均)	頂角 $\theta_{TP} (^\circ)$	回折効率の平均 (%) (6 波長, P/S 波の平均)
70	61.03		
71	61.26	81	62.67
72	61.48	82	62.70
73	61.68	83	62.71
74	61.87	84	62.69
75	62.04	85	62.65
76	62.19	86	62.57
77	62.33	87	62.48
78	62.45	88	62.36
79	62.54	89	62.21
80	62.62	90	62.04

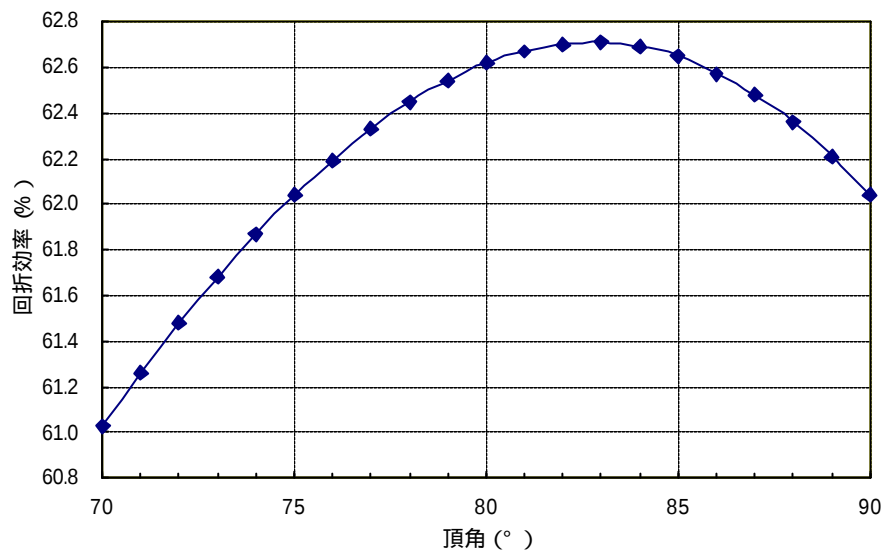


図 14 頂角による回折効率の依存性 (P,S 波平均)

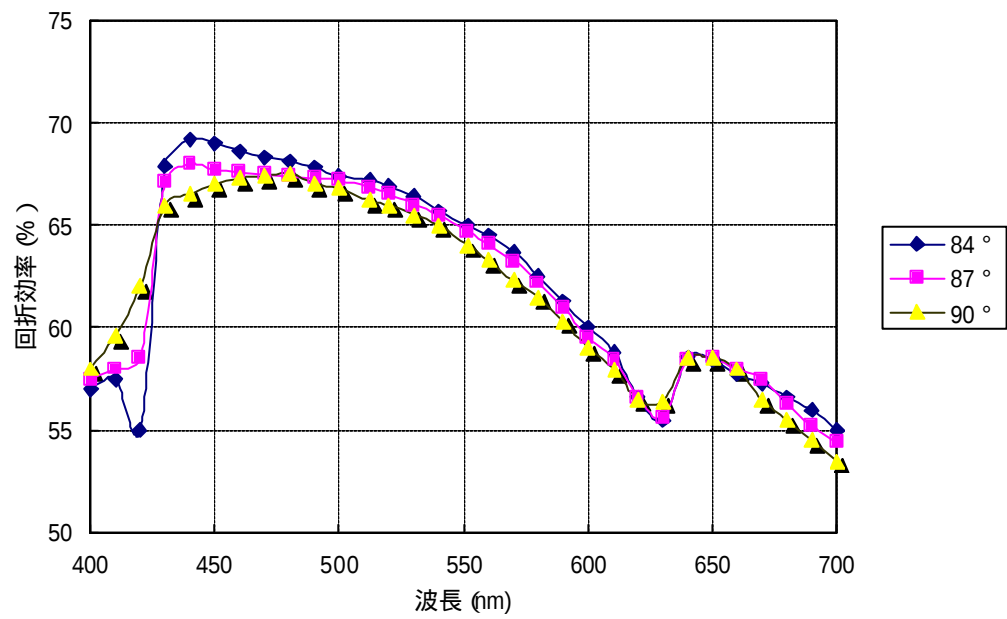


図 1 5 頂角 84 ° 87 ° 90 ° での回折効率 (P , S 波平均) 比較

平均値のグラフから判断すると 83° の回折効率 63.71% が最も高い値である。しかし、 83° では 420nm の青色波長帯で効率が低下している。また可視域全般を通じて良好な回折効率を示しているのは頂角が 84° 以上の場合である。ここで頂角 84° 、 87° 、 90° の各波長について回折効率を比較すると図 15 のようになる。このグラフからも頂角が大きくなるにつれて波長 $420 \sim 430\text{nm}$ 付近での落ち込みが緩和されてくることが分かる。また実際に使用する P 波についても同様なシミュレーションを行った結果、傾向として P, S 波平均の場合と同様であることを確認した (図 16)。

これらを総合的に判断し、ブレイズ角 $\theta_B = 20^\circ$ においては、頂角 $\theta_{TP} = 90^\circ$ で良好な回折効率を得られる事が判明した。

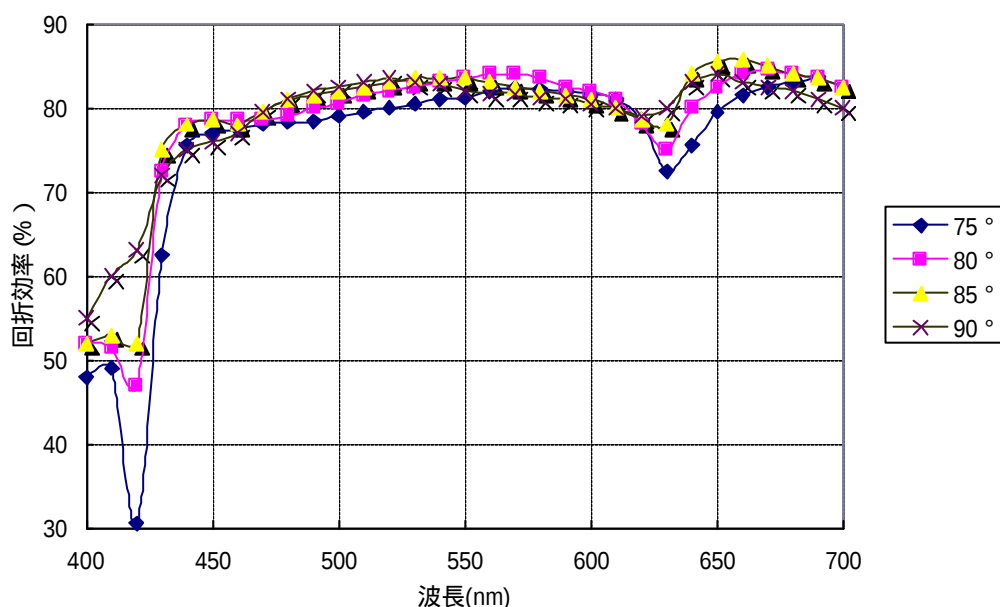


図 1 6 頂角 75° 80° 85° 90° での P 波の回折効率比較

同様に $\theta_B = 20 \sim 25^\circ$ における最適頂角を求めたところ、頂角 90° にすると青色波長帯で高い回折効率を得られることが分かった。

次に、頂角 θ_{TP} を 90° に固定し、ブレイズ角 θ_B を $20 \sim 25^\circ$ に変化させて前述の 6 波長に対する平均回折効率を求めた。その結果を表 3 及び図 17 に示す。

表 3 頂角 90° 固定でブレース角を変化させた時の回折効率

ブレース角 $\theta_B (^\circ)$	頂角 $\theta_{TP} (^\circ)$	回折効率の平均 (%)
20	90	62.69
21	90	62.68
22	90	62.73
23	90	62.23
24	90	61.25
25	90	59.85

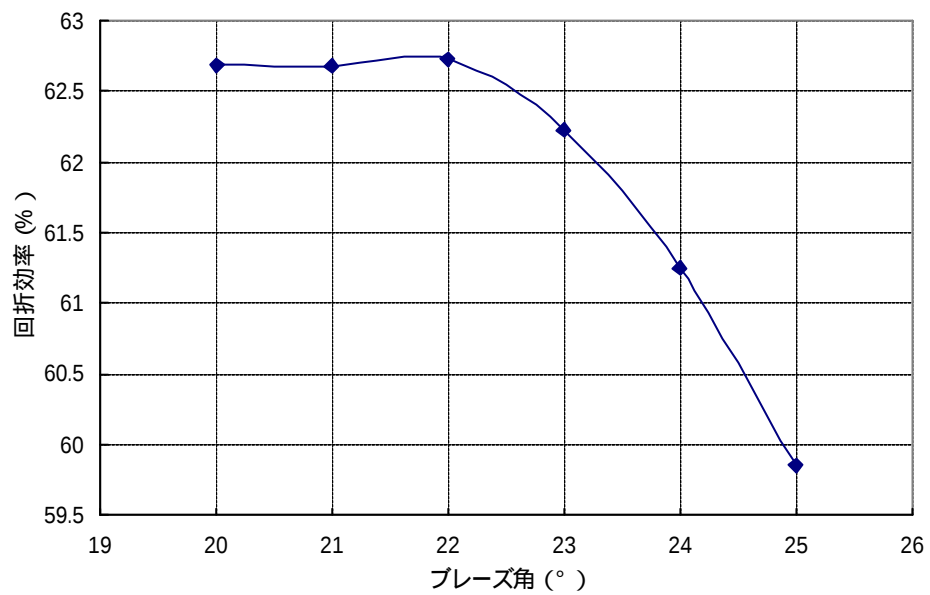


図 1 7 各ブレース角における回折効率 (P , S 波平均)

図 17 の結果に基づき，P 波におけるブレイズ角 $\theta_B=20^\circ \sim 23^\circ$ における回折効率の波長依存性のシミュレーションを行った．その結果を図 18 に示す．

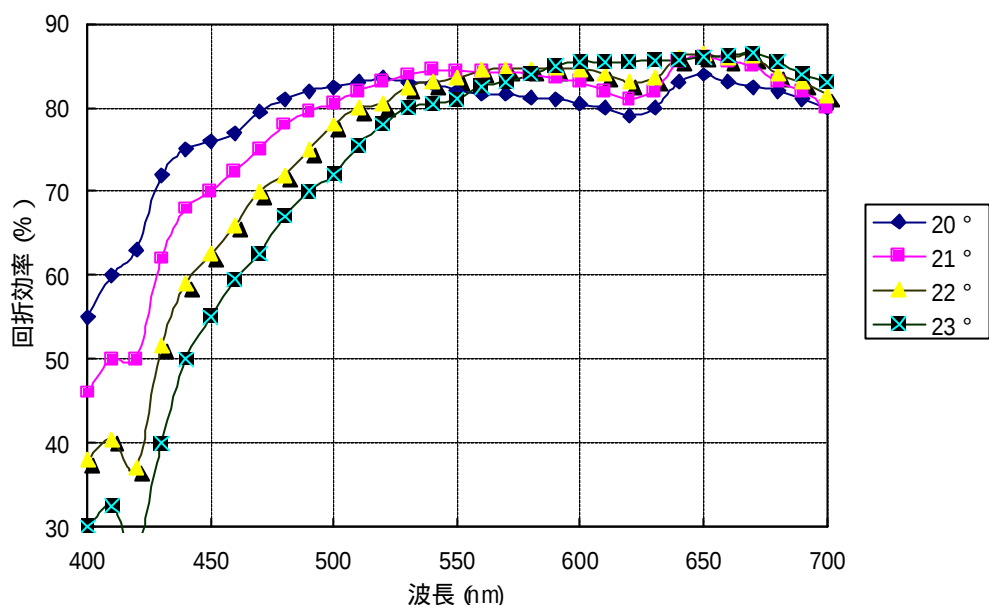


図 1 8 各ブレイズ角における P 波の回折効率

この結果から以下の傾向が得られた．

20 ~ 25 ° と大きくなるにつれて，波長 420 ~ 450 nm で効率が下がってくる．

回折効率の平均値を見ると最も高いのはブレイズ角 20 ° である．

全体的なバランスが良いのはブレイズ角 21 ° であるが，

420 ~ 450 nm の効率が 20 ° に対して低い．

これらの考察の結果，ブレイズ角 $\theta_B=20^\circ$ ，頂角 $\theta_{TOP}=90^\circ$ を採用した．

この結果，得られた回折効率を図 19 に示す．ここでは P 偏光の効率を示す．これによると可視光全域でほぼ 80% の高い効率（1 次光の回折）が得られることが分かる．比較のためにすでに市販されている従来の回折格子の事例も示す．この例では低波長側に注目したため高い効率を得られているが，長波長側では急速に効率が悪くなっている．表 4 に上記手順で決定した回折格子のパラメータを示す．

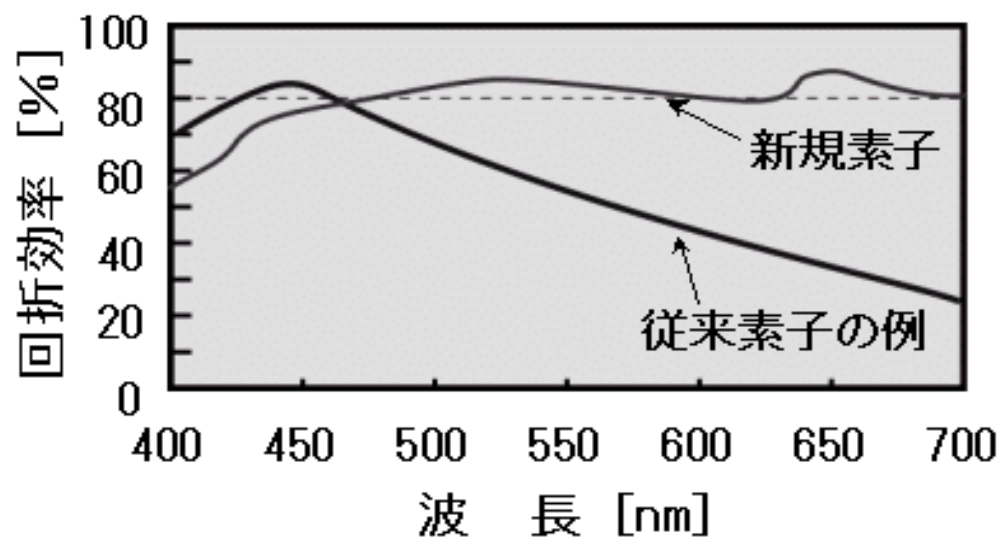


図 19 回折格子のシミュレーション結果 (P 波)

表 4 回折格子の仕様

溝ピッチ d	710nm
ブレース角 θ_B	20.0°
頂角 θ_{TP}	90.0°
光入射角度 ϕ	56.0°
偏光	P偏光
回折効率	平均 80%

3.5 回折格子の製作

素子構造(ブレードタイプ)は図8に示すように、成型された樹脂上にアルミニウム(A1)の反射膜が形成されている。成型に用いる原版は、設計のピッチ、ブレード角、頂角を持つように超精密加工される。この原版(マスター)を基にして樹脂成型にてレプリカを作成する方法を図20に示す。

まず原版を用いて凹凸が反転したスタンパが金属で形成される。このスタンパを用いて、樹脂やガラス基板上に塗布されたUV硬化樹脂を硬化成型し、原版と同じ凹凸形状をもつレプリカが形成される。最終的な回折格子はこのレプリカの表面にアルミニウム等の反射率の良い金属膜を蒸着等で形成し完成する。

この方式の特長は原版から容易にレプリカを量産することが可能な点にある。写真1は試作されたレプリカのサンプルである。同様に図21は試作レプリカの断面形状測定の結果を示しており、表面精度に関してはPV値(面粗さのピーク to バレー)値で10nm以下が実現できており鏡面性に問題はなく、十分な反射率と回折効率が得られる形状精度が得られていることを確認した。

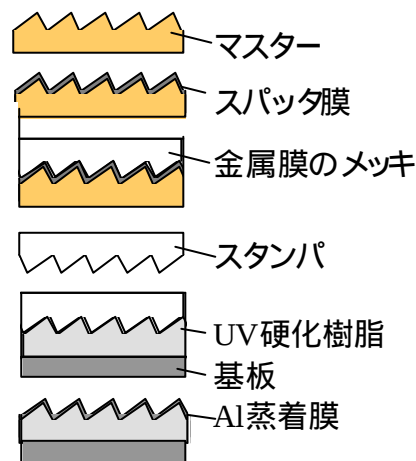


図20 レプリカ作成フロー図

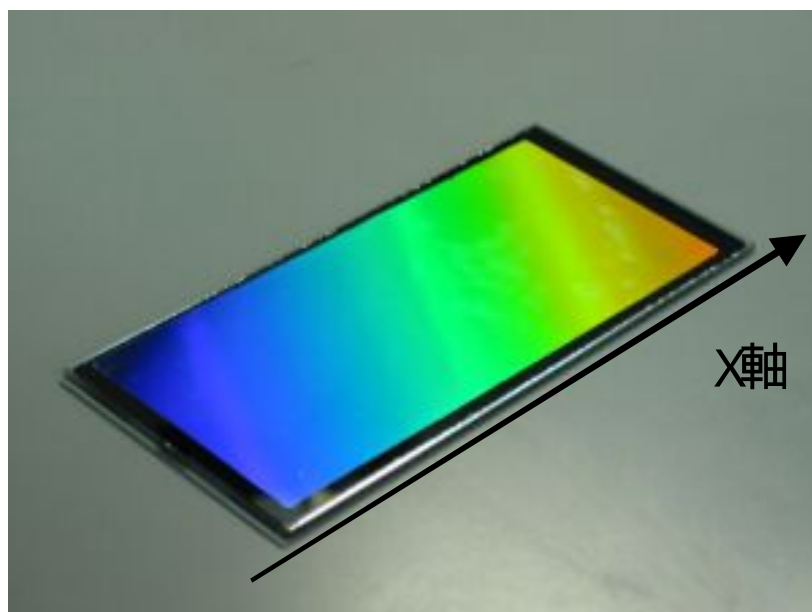


写真 1 試作レプリカ

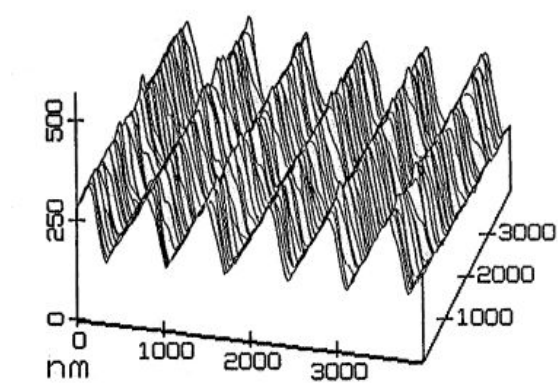


図 2 1 レプリカの断面測定

第4章 照明 ,投写光学系の開発と

プロジェクションシステムの試作 ,評価

4.1 はじめに

前述の設計 , 作製手法によって開発された回折格子を利用することにより白色光を分光し 1 枚の LCD パネルに入射して , フルカラー画像を再生するカラーグレーティング方式のプロジェクションシステムを開発する .

本システムは , 従来 3 板式 LCD プロジェクタのように , 白色光が略平行光で LCD に入射する条件とは異なり , 回折格子により R G B 各色光が所定の角度を有して LCD パネルに入射する . そのため , システム実現のためには , LCD パネル , 照明光学系および投写レンズの諸仕様全てに対して固有の最適化を図る必要がある .

そこで , LCD パネルに搭載されたマイクロレンズの仕様 , 投写レンズ F ナンバー , 回折格子による分散角の変化などを考慮し , 本システムにとって高輝度かつ良好な色再現を得るべく各パーツのマッチングをとりながら設計を行った .

また , 光利用効率向上を目的とした新規光学系としてプリズムアレイ方式を開発し , 偏光の有効活用を行った . 本章では , これら各パーツの設計手法とプリズムアレイ方式の詳細 , さらに今回試作を行ったリアプロ TV の性能評価について述べる .

4.2 LCD パネル

カラーグレーティング方式では、マイクロレンズアレイ付きの1枚のLCDパネルを必要とするが、マイクロレンズアレイは昨今LCDの実効的な開口率を向上させるための製造技術として進展し、類似の仕様のマイクロレンズアレイ付LCDパネルがすでに市販されるに到っている。本プロジェクションシステムに搭載したLCDパネルは対角1.43インチの76.8万画素で入射側にマイクロレンズアレイを装着しており、R、G、B3画素に1つのマイクロレンズが対応している（図22、表5）。

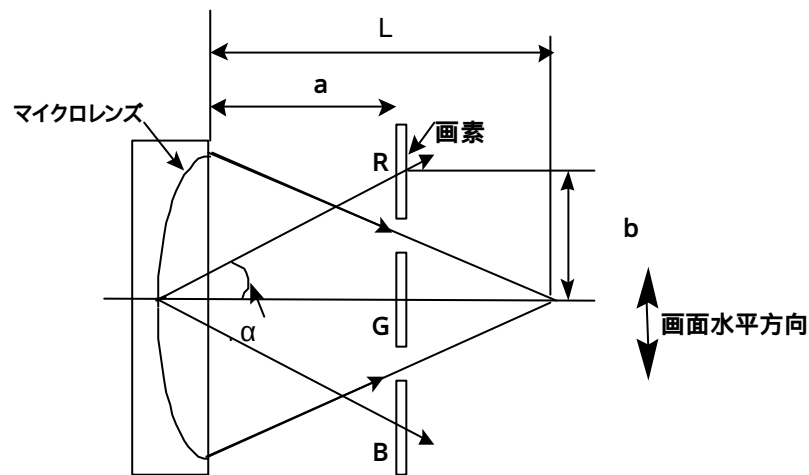


図 22 LCD パネルとマイクロレンズ

表 5 LCD パネルの仕様

項目	内容
液晶	高温 P - S i
画面サイズ	対角 1.43インチ
画面アスペクト	16:9
画素サイズ	19.8 μm × 37.0 μm
画素数	767,760画素
表示エリア	31.68mm × 17.76mm
画素配列	デルタ配列
開口率	45.3% (マイクロレンズで実効約 65%)
RGB分散角	7.5°

4.3 プリズムアレイ方式照明光学系

光源からの光を LCD パネルに入射させる照明光学系は，投写された画像の明るさを決定する．カラーグレーティング方式においては，回折光を有効に利用するためと，LCD の表面に装着されたマイクロレンズから画素に効率的に光を集光させるために，通常の 3 板方式の LCD プロジェクションに比べより平行度の高い光源からの光が要求される（図 7）．必要とされる平行度は使用する LCD パネルのマイクロレンズの焦点距離，投写レンズの F ナンバーから決定され，例えば本システムでは光源側に要求される光平行度は $\pm 6^\circ$ である（従来 3 板方式では約 $\pm 12^\circ$ ）．またプロジェクションシステム用の光源としてのランプに関し，光の平行度はランプアーク長に大きく依存し，アーク長が小さいほど点光源に近くなりランプの背面に設置された反射鏡(リフレクタ)により，平行度の良い光線が得られる．経験的にアーク長 1.5mm 以下のものが要求されることが判明しており，この条件を満たし且つ高い光出力を達成するランプとしては，すでに超高压水銀ランプ（UHP）で実現され市販されるに到っている．本ランプを用いてリフレクタを新規に設計し所期の目的を達成した．

次にランプからの光を回折格子に導き，LCD パネルに入射させる効率の良い照明光学系の開発を行った．LCD パネルは原理的に，P 波あるいは S 波のみしか利用できない．さらには前述のように本開発の回折格子も P 波用に最適設計されているため，平行度の良い P 波の光線を効率よく発生す

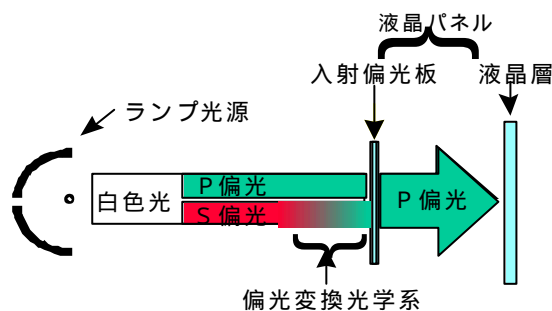


図 23 LCD プロジェクションにおける P, S 偏光波有効利用の概念

る照明光学系の開発が必須である（図 23）。

ここでは新規な照明光学系「プリズムアレイ方式」を採用した光学エンジンについて述べる．図 24 に示すような断面を持つプリズムアレイを LCD 画面水平方向に配列する．ランプからの光は PBS(Polarizing Beam Splitter)，位相差板，2 枚の反射ミラーで 2 方向からの P 波に分解されプリズムアレイに入射光 1 と入射光 2 として入射する（図 25）．2 方向の P 波に分解するのはランプからの S 波も P 波に変換して有効活用するためである．入射光 1 と入射光 2 はプリズム内で屈折し，同一方向の平行な光線に合成される．

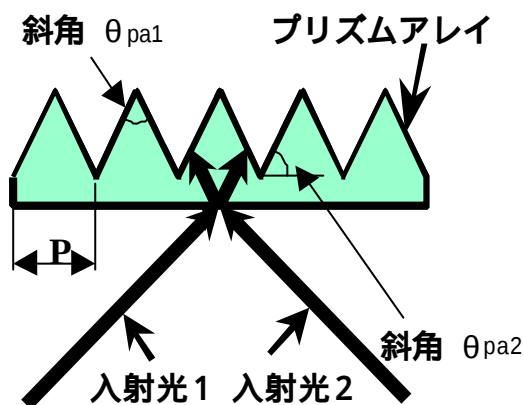


図 24 プリズムアレイの原理

プリズム形状決定の条件としては，プリズム斜面の角度（ θ_{pa2} ）とプリズム内部透過光の進行方向が同一となり，透過光のプリズム斜面におけるケラレ損失が発生しないよう θ_{pa2} を決定した．材料は一般的な光学ガラスである BK7 を使用し， $\theta_{pa1} = 63^\circ$ ， $\theta_{pa2} = 58.5^\circ$ となった．プリズムピッチについてはプリズム斜角（ θ_{pa1} ， θ_{pa2} ）とは独立したパラメータであり，0.5～5.0mm のものを試作評価した結果，ピッチが大きいとスクリーン画面上に縦縞が発生し，逆に小さいと成型時の頂角の鈍り（約 0.2R）により光平行度が乱され光利用効率が低下することが実験的に判明した．これを踏まえ，スクリーン上の縦縞が視認されない範囲で最もピッチが粗い 3.0 mm を選択した．

最終試作プリズムアレイの仕様は， $\theta_{Pa1} = 63^\circ$ ， $\theta_{Pa2} = 58.5^\circ$ ，ピッチ 3.0mm，山の高さは 2.45mm，長さ 45mm のサイズである．

上記プリズムアレイ照明光学系を利用した光学エンジン“PEGASAS”を図 25 に示す．この光学エンジンにおいては，上述のようにランプからの光は互いに直交する 2 つの P 波に効率よく変換され，プリズムアレイに入射し平行度の良い P 波として回折格子に入る．回折格子では可視光全域で約 80% の効率で 1 次光が回折され LCD パネルに入射する．また本エンジンは従来の 3 板方式（図 5）に比べ LCD パネルが 1 枚であることと光学部品点数が少なく，従来の 3 板方式に比べアセンブリーが容易なことが特長である．

上記光学エンジンにて，プリズムアレイの測定評価を行った．

従来のランプからの P 波のみ利用する方式の光量を 100 ルーメンとした場合，本方式では 132 ルーメンの測定結果が得られた．ランプ発光部が点光源で無く一定の長さを持っていることに起因するランプ光源からの光分散角（ $\pm 6^\circ$ ）のため，一定の光がプリズムアレイで迷光となっていると推察されるが，従来方式に比較して光量が約 1.3 倍に増大することを確認した．

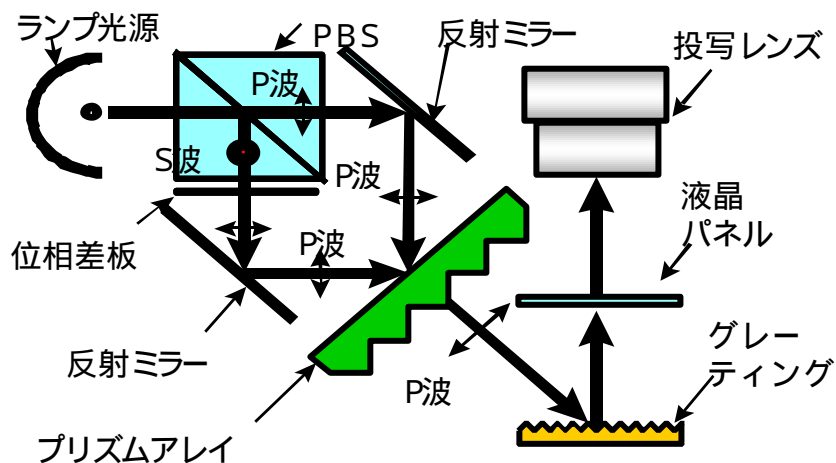


図 25 光学エンジン“PEGASAS”の構成図

4.4 投写レンズ

投写レンズは LCD パネル上の画像をスクリーンに数十倍に拡大投写するものであり、照明光学系とのマッチングをとりランプからの光の損失を最小限にするような設計が必要である。ここでは本カラーグレーティング方式を 40 インチリアプロ TV に応用するに最適なレンズを設計した。まず TV セットの奥行きを薄くするためレンズの広角化が必要であったので、レンズ群の一部にプラスチック製の非球面を導入することにより、550mm の短い投写距離を可能にした。また回折格子により回折された光はマイクロレンズで集光後発散し約 $\pm 20^\circ$ の発散光となり投写レンズに入る。

このためこれらの発散光を効率よく取り込むため F ナンバー 1.5 の明るいレンズ設計を行った。さらにカラーグレーティング方式特有の画面周辺での色ムラ対策を行う必要がある。図 26 に示すように LCD パネルからの赤 (R)、青 (B)、緑 (G) の光は回折光に起因して指向性を持って出射される。このためパネルの左右端が R あるいは B の強い色ムラが発生する可能性が高い。本投写レンズでは画面周辺部の光も十分に取り込むようレンズ口径を大きくする等の対策を行った結果周辺光量比 75.6% が達成され、色ムラの発生を抑えることができた。

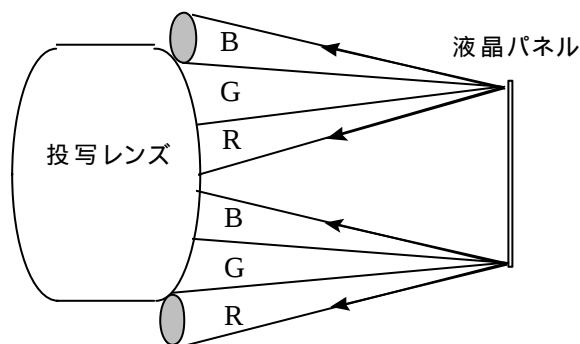


図 26 投写レンズの周辺光量比

表 6 に開発した投写レンズの使用を示す .

表 6 投写レンズ仕様

投写距離とスクリーンサイズ	550mmで40インチ
焦点距離	20.9mm
Fナンバー	1.5
バックフォーカス	27.9mm
イメージサークル	Φ 40
周辺光量比	75.6%
MTF	20 lp/mm
歪曲収差	+ 0.6% , - 1.92% 以内
レンズ全長	150mm
前玉有効径	Φ 77.5
後玉有効径	Φ 56.8

4.5 カラーグレーティング方式プロジェクションTV[32]

上記の構造が簡単な光学エンジンを搭載したリアプロ TV を開発したので以下に述べる。リアプロ TV は、PDP や直視型 LCD 等の薄型 TV に比較して大画面化が容易であり、消費電力の点でも有利である。消費電力は主に光源であるランプの発光効率に大きく依存するが、プロジェクション用のランプ発光効率の非常に高い超高压ランプの採用により低消費電力を実現した。開発されたスクリーン対角 40 インチの TV を図 27、写真 2 に、仕様・性能を表 7 に示す。また、今回開発した光学エンジンとキーコンポーネントを図 28 に示す。奥行き 39cm の薄型化が計られると同時に 200W の低電力で十分な明るさ (300 cd/m^2) が得られている。また色再現性も従来のカラーフィルタ単板方式よりも広く、3 板 LCD 方式と比較して遜色はない(図 29 の色度図参照)。解像度は 480 P 対応であるが、カラーグレーティング方式はさらなる高精細 LCD にも対応が可能であり、LCD パネルの今後の高精細化により単板ハイビジョン対応パネルが開発されれば、ハイビジョンリアプロ TV の実現が可能となる。この様にカラーグレーティング方式は、そのシンプルな光学構成から、リアプロジェクションとして有望な方式であると考ええる。

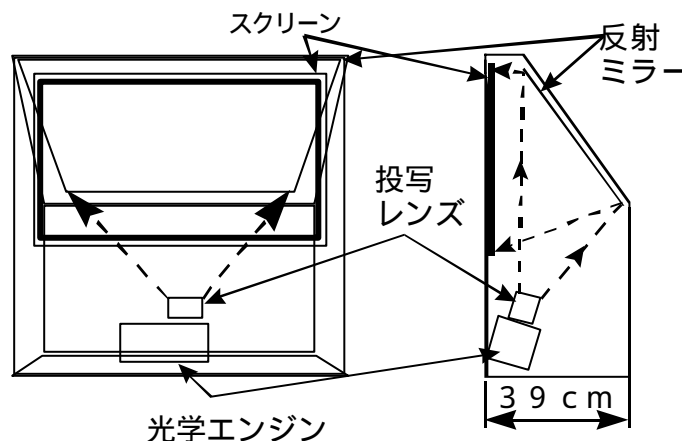


図 27 リアプロ TV 概略構成図

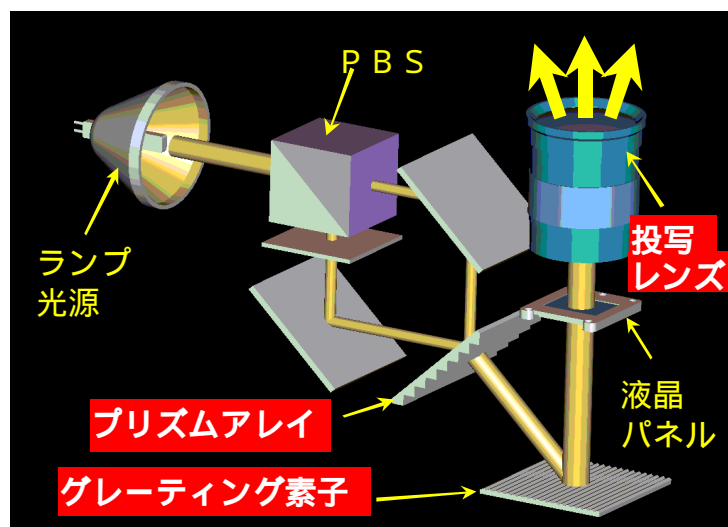


図 28 光学エンジン (PEGASAS) とキーコンポーネント

表 7 リアプロTV 仕様 性能

画面サイズ	40 インチ (アスペクト16:9)
色分離方式	カラーグレーティング方式
LCD パネル	1.43 インチ ,1600x480 画素
光学エンジン	単板 LCD リア方式
水平解像度	約 600 TV 本
スクリーン輝度	300 cd/m ²
TV セットサイズ	1053(W)x1123(H)x390(D) (mm)
消費電力	200W



写真 2 カラーグレーティング方式 40インチリアプロ TV

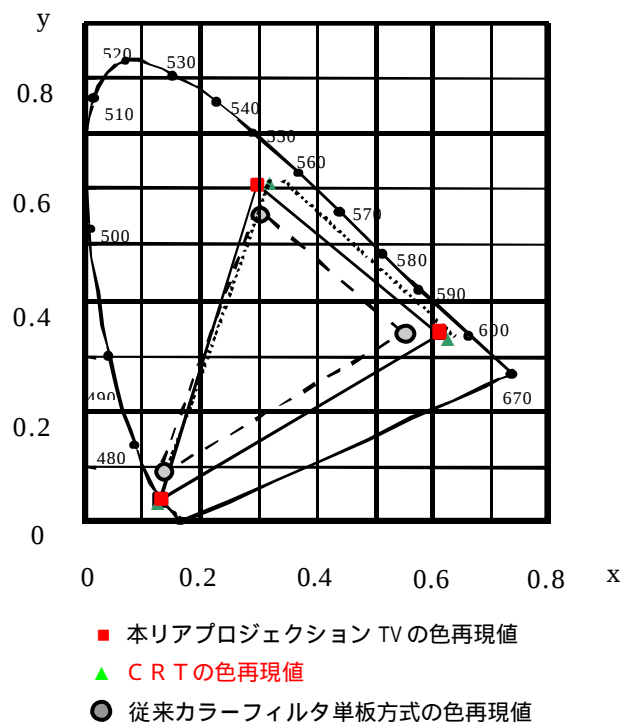


図 29 色再現範囲

第 5 章 結論

回折格子を用いて色分離を行い 1 枚の LCD パネルでカラー再生する新規なプロジェクション方式「カラーグレーティング」を提案し，光学シミュレーションを行うとともに，試作検証した．

回折格子のシミュレーション設計を行い，可視光の広い範囲（450 ～ 700nm）で約 80% の高い回折効率が得られることが判明した．このシミュレーション結果のパラメータを有するレプリカの試作も行った．

本方式のプロジェクションシステムを実現するために必要な新規プリズムアレイを利用した照明光学系を新たに開発すると共に，ランプ用の新規なリフレクタ及び投写レンズの最適設計も行った．

上記開発技術を利用した 40 インチのリアプロ TV セットの試作を行い，画質評価した結果，他の大画面ディスプレイと遜色のない性能を得た．

本方式の TV セットは光学エンジンの構造が簡単で量産容易であり，消費電力 (200W) も小さいという特長を有している (代表的な 42 インチ PDP は 370W，37 インチ LCD は 210W)．また，ランプ及び投写レンズの仕様変更で 60 インチなどの大画面ディスプレイに容易に展開することが出来る．

昨今の地球環境の問題，即ち消費電力，廃棄物処理及びリサイクルの観点から考えても，本カラーグレーティング方式のプロジェクション大画面 TV は他方式に比べて優れていると考える．

謝辞

本論文は、著者が奈良先端科学技術大学院大学在学中に研究発表、学会論文誌投稿した研究内容を論文としてまとめたものである。

同大学院大学在籍中に、数々の有益なご教示と心暖まる激励を賜りました千原國宏教授に深く御礼申し上げます。

また、論文審査にあたり、適切な助言と御指導を頂きました横矢直和教授、木戸出正繼教授に心から御礼申し上げます。

さらに、論文作成などに際して懇切丁寧なご教示と数多くのご助言をいただきました眞鍋佳嗣助教授に深く感謝の意を表します。

本研究は、著者が三洋電機株式会社研究開発本部デジタルシステム研究所にて行ったものをまとめたものであり、研究の遂行、ならびに論文をまとめる機会を与えてくださいました三洋電機研究開発本部の小野本部長、吉年副本部長に深く感謝致します。

また、研究活動はもとより、論文作成にあたり、多大な協力をいただきましたデジタルシステム研究所の村田和彦部長、金山秀行部長、岸本俊一顧問、池田貴司課長を始め多数の方々に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Hiroaki Kitamura, Mitsutaka Morimoto, Hidehiko Katatoh, Masaya Hijikigawa: "Long Term Roadmap and Technology of TFT-LCD toward 2010 ", IDW '02, pp.291-294.
- [2] 松山駿介, 斉藤光一: "PDP テレビの普及へシナリオ再構築 " flat-panel display 2003 , pp.152-154.
- [3] "2003 年 FPD 事業環境が一変 " flat-panel display 2003 , pp.32-43.
- [4] "2004 液晶関連市場の現状と将来展望 (上巻)" :富士キメラ総研.
- [5] 田村喜男: "フラットパネルテレビ市場 ", 第 6 回ディスプレイサーチフォーラム 2003 (ディスプレイサーチ社).
- [6] 松野智吏: "フラットディスプレイ市場の現状と長期展望 ", 第 6 回ディスプレイサーチフォーラム 2003 (ディスプレイサーチ社).
- [7] Frederic J. Kahn : "Projection Display Technology and Market: US Prospective ", IDW '96 pp.415-418.
- [8] Leon Shapio : "ProjectionSystem Tradeoffs ", IDW '97 p.785-788.
- [9] S.Ogawa, M.Yano : "Prospects of CRT Projection Display ", IDW '98 pp.409-412.
- [10] Shinsuke Shikama, Eichi Toide, Mitsushige Kondo : "A Polarization Transforming Optics for HighLuminance LCD Projectors ",EuroDisplay '90 pp.64-67.
- [11] Masato Hatanaka, Yusaku Tagawa, Atsushi Iwamura : "High Luminous Efficency Optical ystem for 3LCD Rear Projection TV ", IDW '97 pp.793-795.
- [12] Tetsuya Kobayashi , Tsuyoshi Kamada, Takatoshi Mayama, Mari Hodate, Toshihiro Suzuki, Hisashi Yamaguchi : " High Brightness LCD Projector with

- High Transmission 3.2-in SVGA TFT-LCD ", IDW '98 pp.765-768.
- [13] 成田貴光 ,佐野勝敏 ,斉藤 裕 :“家庭用 40 型プロジェクションテレビシステム”,東芝レビュー ,Vol. 52 ,No.6 ,pp.8-10 , 1997.
- [14] L.J.Hornbeck :“From Cathode Rays to Digital Micromirrors: A History to Electric Projection Display Technology”, Texas Instruments Technical Journal, Vol.15, No.3,p.10(Jul-Sep.1998).
- [15] L.J.Hornbeck :“A Digital Light Processing Update Status and Future Applications”, Proc.SPIE, Vol.3634.pp158-170,January 28,1999.
- [16]Y.Masumoto,M.Wada,Y.Fushimi:“Simplified Projection TV Optics Using DMD”, IDW'03, pp.1573-1576.
- [17] 特許第 3416434号 : 金山秀行 他, 「カラー液晶表示装置」, 2003 年
- [18] 岸本俊一 : “1 インチ5000 円」で大画面テレビの主演へ ” ,日経エレクトロニクス 10-25 ,pp.105-113, 1999.
- [19] F.Morin: “An Image Projector Using an Active Matrix Display ”, Eurodisplay '87 Sep.,1987.
- [20] S.Morozumi: “LCD Full-Color Video Projector ”, SID '86 Digest, pp375(1986)
- [21] 中西浩 ,浜田浩 他 :“モザイクカラーフィルタを用いない高輝度単板プロジェクション方式 ”,テレビジョン学会 情報ディスプレイ研究委員会技報 ,IDY95-41 , pp.1-5.
- [22] H.Hamada:“Optical Systems for High-Luminance LC Rear Projection”, SID'96 DIGEST pp911-914.
- [23] 貝瀬喜久夫:“液晶のリアプロジェクション TV への応用 ”, 電子ディスプレイ・フォーラム 97 (講演集) pp.322-325.
- [24] T.Yamazaki, M.Tokumi, T.Suzuki,S. Nakagaki, S.Shimizu :“The Single-Panel D-ILA Hologram Devices for ILA Projection TV ”, IDW '00, pp.1077-1080, 2000.
- [25] 波岡 武 :“分光機器第1講分光器概論 “ ,分光研究第34巻第1号 pp.41-53., 1985.
- [26] 堀田 豪 :“液晶プロジェクタ用ホログラム素子 ”,テレビジョン学会技術報告 Vol.20,No.60,pp.60-72, 1996.
- [27]味戸剛幸 ,小尾高史 ,山口雅治 ,大山氷昭 :“回折格子を用いた多原色による

- カラー表示法”,テレビジョン学会技術報告 Vol.20,No.60,pp.69-72, 1996.
- [28]西村 節,佐藤辰巳:”分光技術第3講可視紫外線分光技術“,分光研究第 42 巻第 4号 pp.253-267, 1993.
- [29]Herwig Kogelnik:”Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings”,The Bell System Thechnical Journal Vol.48,No.9,pp2909-2947, November 1969.
- [30] 瀬谷正男,後藤克也:”廻折格子による廻折光の強度分布について”, 分光研究 第5巻・第1号, pp.16-22, 1956.
- [31] 中田康則,小柴正則:”任意の複素誘電率を有する金属格子による平面波回折の境界要素法解析”,電子情報通信学会論文誌 C Vol.J71-C, No.10, pp.1412-1418, 1988.
- [32] Y.Funazou, H.Kanayama, D.Takemori, Y.Furuta, T.Hachiya, T.Miwa, K.Yamauchi, K.Terada, S.Kishimoto ;”A New Rear-Projection Display Based on the Color Grating Method”, SID1998, pp.199-202, 1998.

研究業績

[研究論文]

船造康夫, 金山秀行, 千原國宏 : "回折格子を利用したプロジェクションシステム", 画像電子学会誌, Vol.33, No.6, pp.1132-1140, Nov. 2005. [第 2, 3, 4 章]

船造康夫, 杉下正蔵, 岸本俊一 : "ビームインデックス方式 3型フラットカラーテレビ", テレビジョン学会誌, Vol.40, No.10, pp.1018-1023, Oct. 1986. [第 1 章]

[工業所有権 (特許)]

船造康夫他 : "投写型映像表示装置"

特許登録番号 特許第 3584031 号 (登録日 2004 年 8 月) [第 1 章]

船造康夫他 : "液晶プロジェクタ"

特許登録番号 特許第 3167434 号 (登録日 2001 年 3 月) [第 1 章]

船造康夫他 : "平面型蛍光ランプ及びこれを用いた液晶プロジェクタ"

特許登録番号 特許第 3128274 号 (登録日 2000 年 11 月) [第 1 章]

[国際会議]

Yoshitaka Kurosaka, Takashi Ikeda, Kenji Tateishi, Kensuke Konishi, Toshio Obase, Hideyuki Kanayama, Yasuo Funazou, "Development of ultra-compact color separation and recombination system comprised of only one cubical space", IDW' 02, pp.469-472, Dec. 2002. 第1章]

Takashi Ikeda, Hideyuki Kanayama, Kensuke Konishi, Toshio Obase, Yoshitaka Kurosaka, Kenji Tateichi, Yasuo Funazou, "Developing of a New LCoS projector with Ultra Compact Color Separation and Recombination System", SID MICRODISPLAY 2002, pp.14-17, Sep. 2002. 第1章]

Hideyuki Kanayama, Shoichi Yoshii, Kazuhiro Arai, Yoshihiro Furuta, Yasuo Funazou, "Development of a New Rear-Projection Display with an Aspherical Mirror Projection System", IEEE(ICCE) Digest 2001, pp.8-9, Jun. 2001. 第1章]

Hideyuki Kanayama, Shoichi Yoshii, Yoshihiro Furuta, Kazuhiro Arai, Susumu Tanase, Takashi Miwa, Kenji Tateichi, Yoshitaka Kurosaka, Yasuo Funazou, Shun-ichi Kishimoto, "A New LC Rear-Projection Display Based on The Aspherical Mirror Projection System", IDW'00, pp.1041-1044, Nov. Dec, 2000. 第1章]

Yasuo Funazou, Hideyuki Kanayama, Daisuke Takemori, Yoshihiro Furuta, Takeshi Hachiya, Takashi Miwa, Kenji Yamauchi, Katsumi Terada, Shun-ichi Kishimoto ; "A New Rear-Projection Display Based on the Color Grating Method", SID1998, pp.199-202, May 1998. 第2, 3, 4章]

Yasuo Funazou, Kazuhiko Takeuchi, "750TV-line resolution projector using 1.5Mega pixel a-Si TFT LC Module", SID1991 Digest p.415-418, May 1991. 第1章]

Yasuo Funazou, Kenji Yamauchi et al., "High Definition LC Video Projector", ICCE 1990, June 1990. 第1章]

Takahisa Ando, Ken Mashitani, Masahiro Higashino, Hideyuki Kanayama, Haruhiko Murata, Yasuo Funazou, Koji Koyamada(Kyoto University), "Multi-view image integration system for glass-less 3-D display", Electronic Imaging 2005, Jan. 2005.

Yoshihiro Yokote, Kazuhiro Arai, Syoichi Yoshii, Takashi Miwa, Mineki Taoka, Toshiya Iinuma, Hideyuki Kanayama, Haruhiko Murata, Yasuo Funazou, "A New Projection System based on the Light Scrolling Method for Motion Pictures", IDW' 03, pp.1593-1596, Dec. 2003.

Yasuo Funazou, Goro Hamagishi, Ken Mashitani, Kenji Takemoto, "Recent Development of 3-D Displays using LCD Technologies", IDW'03, pp.1393-1396, Dec. 2003.

Yasuo Funazou, Goro Hamagishi, Ken Mashitani, Kenji Takemoto, Kunihiro Chihara, "Recent Development of 3-D Displays using LCD Technologies with Head-Tracking System", IEEE(LEOS), Vol.2, pp.658-659, Oct. 2003.

[解説論文]

船造康夫, 金谷経一, 大今進, 山田努, 木原勝也 : "液晶ビデオプロジェクタ", SANYO TECHNICAL REVIEW, Vol.21, No.3, pp36-44, Oct. 1989. 第1章]

船造康夫, 榎並和雅, 高室孝章, 川口洋人, 藤沢秀一 : "特集 地上デジタル放送", 電気学会誌, Vol.124, No.9, Sep. 2004.

船造康夫 : "地上デジタル放送がもたらすテレビ新時代", SANYO TECHNICAL REVIEW, Vol.36, No.6, pp3-10, June 2004.

[国内発表]

船造康夫, 金谷経一, 大今進, 山田努, "最近の大型表示装置とその光源 カラー液晶ビデオプロジェクタ", 電気・情報関連学会連合大会講演論文集, Vol.1989 No.Pt3, pp.3.79-3.82, Aug. 1989 [第1章].

船造康夫, 岸本俊一, 田中達雄, 杉下正蔵, 松平盛夫, 藤永武己, 寺田克美, "6 型ビーム・インデックス・カラーテレビ", テレビジョン学会技術報告, Vol.5 No.34, pp.17-22, Jan. 1982.