

Revra の光路差を応用した次世代眼精疲労軽減レンズ

～新しい機能レンズを求めた～「M-POS レンズ」

Revra 株式会社レブラ

代表取締役 大矢 進

技術顧問 松岡 和夫

I. はじめに

従来眼鏡は視力矯正のために主目的に色々な改良がなされてきました。また、装着時の快適性等を求め、軽量化のためにガラスからプラスチックへ、さらに高屈折率材料へ、光量調節のための染色、反射低減の為に反射防止コーティングなど、多くの技術が研究開発を経て実用化されています。これらの多くの技術は主目的の視力矯正以外に快適な装着感を得る目的に関するものが多く存在します。快適な装着感とは違和感なく長時間装着しても疲労感が出ないことが重要な要件となります。現在ではそれをより改善するため有害光を低減する工夫などが加えられていますが、技術的にほぼ出尽くした感が否めません。

弊社においては 1999 年 10 月レンズ面上の特殊コーティング技法によるネッツペックレンズの製品化に伴う製造販売をしてまいりました。

本稿はこのような状況の中で新たな検知から光を波動光学的に制御することである種の機能を持たせ有害光の刺激低減、鮮明度・コントラスト向上を目的とした光学レンズから快適視生活に貢献します。

II. 開発と製品化の意図

1. 開発目的

従来レブラでは、「眼の疲労を低減する為の眼鏡」というテーマで色々な研究開発を行い製品化して参りました。それらは、コーティング技術、染色技術、偏光技術を応用したものであり、特に偏光技術と染色技術を融合させた製品は眩しさ低減効果が大きく、眼の疲労低減に大きな効果が得られることは承知しています。しかし、この製品製造には優れた特性を持った部材が必要となりコスト高になる欠点がありました。このような状況の中で従来研究して参りましたレンズ表面のパターン化技術の開発を進めることで新しい機能を備えた眼鏡レンズの可能性に追求しました。

そこで、この技術を応用することで眩しさを低減する機能を持ったレンズを提供し眼精疲労の低減に寄与することを開発目的としました。

2. 着目点

眼精疲労の原因については様々な要因が挙げられますが、眩しさも重要な要因の一つと考えられます。さらに、その眩しさもはっきり眩しいと認識出来る眩しさと、眩しさの実感が得られないうが眼に大きな負担を与える現象があることに着目しました。前者は説明の必要が無いと考えますが、後者は有害な光が眼に入った場合を想定します。例えば紫外線が代表例で、視感度が低い波長帯域なので意識することはありませんが、眼に大きな負担を掛けることは明かです。また、最近話題になっているブルーライトもそういった部類に入ってきます。

このような現象をさらに詳しく理解するために、光の波長と眼に与える影響について検討します。表1は網膜への損傷度を波長別にみたものです。（参考文献1より）

表1. 波長別網膜への損傷度

波長 (nm)	網膜損傷度 (比)
400	0.10
420	0.90
440	1.00
460	0.80
480	0.45
500~600	$10 \{ (450 - \lambda) / 50 \}$
600~1400	0.001

注) 波長440nmを基準にした比で示す

表1は網膜が損傷するレベルの影響度を表しているので必ずしも通常状態の影響度を直接示すものではありませんが、波長 $\lambda=440\text{nm}$ 前後の光が目には掛けている負担が大きいことは予測できます。

一方表2（参考文献1より）は眼の紫外線吸収の様子を示したもので、前述で紫外線は有害と記載しましたが実態は網膜に届く前にかなりの量が吸収されてしまうことが判ります。これにより表1のように波長 $\lambda=440\text{nm}$ 前後の光の影響が相対的に大きくなることが判ります。

表2. 紫外線の吸収

紫外線の種類	波長	吸収媒体
短波長紫外線	100-290nm	角膜
中波長紫外線	290-320nm	水晶体 370nm以下
長波長紫外線	320-400nm	水晶体 370nm以下

※網膜への到達 1~2%

近年ブルーライトの影響が着目されるようになってきていますが、このような光の影響度合いも要因の一つと考えられます。

3. 課題

前述の状況を踏まえて光の波長の影響だけを考慮すれば影響度の大きい低波長帯域（以下有害波長帯域と表記する）の透過率を調整すれば影響を低減出来ることは明らかです。また、他にも眩しさの低減を主眼とした製品もありますが、以下のような課題が残っています。

(1) 有害波長帯域の透過率の制御

一定の効果が期待できるが同時に色調も変化するため根本的解決にならない。

(2) 偏光技術の応用

前述II-1でも述べたように乱反射光の低減には絶大な効果があるが、レブラ社の製品は短波長になるほど偏光度が大きくなる偏光子を採用したために生産性が悪くコスト高となり広く普及させることが出来なかった。

(3) レンズ表面のパターン化

これらは幾つかの研究成果が発表されているが、反射防止の効果改善等に関するなど、直接眼の疲労低減に効果のあるような光学技術は極めて少ないか論拠に乏しい

4. 眩しさの考察

眩しさについては既述のように、明確に眩しいと感じる現象と、眩しいと感じないが影響のある現象があると述べました。比視感度と波長の関係はすでに述べましたが、もう一つ重要な現象が考えられます。

比較対象としてカメラの TTL 露出計を考えてみます。TTL 露出計は、露光測光→演算→絞りによる調光、というパターンで撮影時に露光調整が行われます。一方眼鏡の場合は、網膜への刺激→視神経・脳（刺激認識）→虹彩による調整、と TTL 露出計と同じシステムと考えられます。ここで着目すべき現象は、TTL 露出計も眼も光の強度の計測或いは認識は比較的広範囲の面積の平均的な値をもって処理されることです。では、夕方の街並みに夕日が反射しているような状況を想定してみましょう。画面全体は夕方なのでやや薄暗くなり所々に点状の夕日の反射光が輝いて見える状況です。これをカメラの自動露光で撮影すると画面全体は適正露光がなされるため最適な明るさの画像が得られますが夕日の反射はイメージセンサーのダイナミックレンジを超えて白くつぶれてしまいます。これを眼に当てはめると同様な現象が網膜で起こっていると考えられます。イメージセンサーは飽和状態になり最大電流が流れるだけで済みますが、網膜は意識されませんが部分的に大きな刺激を受けることとなります。このようにブライトスポットはオーバーレンジとなるため眩しさは感じなくても大きな刺激を受けていることとなります。

4.1 位相差パターン導入による優位点

前述のような、はっきりと眩しいと感じないようなブライトスポットに対応するためにレンズ表面に位相差パターンを形成し光路差を発生させることで回折現象を利用して有害光の刺激を低減する事。

この方式の優位点は次の通りです。

- 解像力を司る緑の波長帯では無収差となるので視力校正に関する性能には影響が無い。
- 有害波長帯域の青色光に対してはエネルギー密度を低減させることで眼への刺激を低減する。

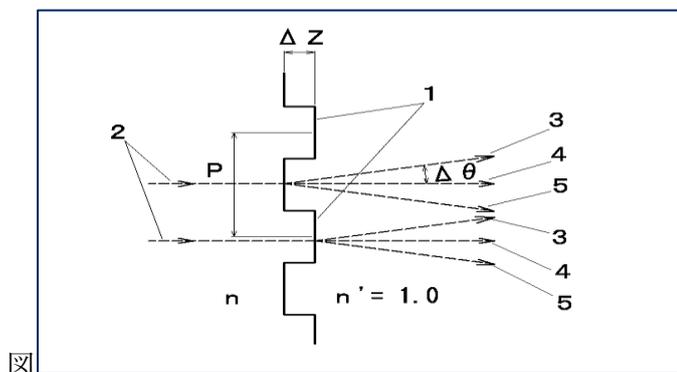
III. 原理

当該製品は回折光学系の理論に基づいて開発されています。以下にその考え方を説明します。

1. 位相差発生とその効果

1.1 原理

レンズの表面に凹凸のパターンを形成し、そのパターンを図1とします。



1. 位相差パターン

図の説明は以下の通りです。

1. 界面（レンズ表面）
2. 透過光線（段差凸面、凹面）
3. 一次回折光（プラス）
4. ゼロ次回折光
5. 一次回折光（マイナス）

ΔZ : 段差 ($\Delta Z - \Delta Z/n = m \lambda a$)

P: パターンのピッチ

n: レンズ材質の屈折率

$\Delta \theta$: 回折角

$$\lambda' = \lambda a - \lambda$$

(λa : 基準波長、 λ : 任意波長)

η : 回折効率

a: 位相 ($\lambda / \lambda a$)

$$\Delta \theta = \sin^{-1} * (2m \lambda' / P)$$

($m = 1 \text{ or } 2$)

$$\eta = \text{sinc}^2(a-m)$$

レンズ表面に段差 ΔZ が出来ると光路長に差が発生することで、波長により異なる位相差が発生します。この様子を波面として観察すると図2のようになります。

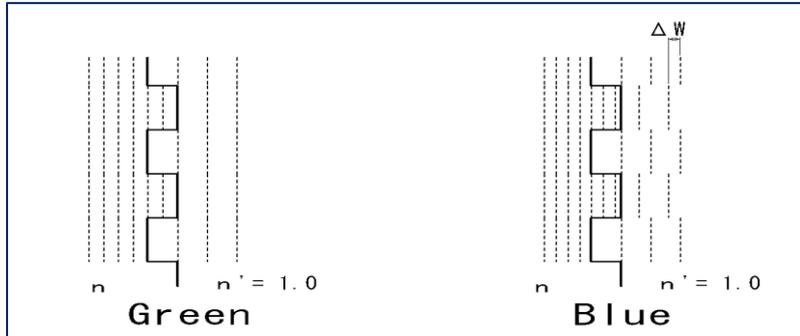


図2. 透過波面の変化

図2はグリーン光に於いて丁度光路差が1波長になるようなパターンを示しています。この場合、光路差が丁度1波長になるため位相差はゼロとなり、段差により波面の一部が1波長分の進行に差がついているにも拘わらず波面は同一振動面として振る舞います。その結果無収差と同じ状態となるのでグリーン光による解像度に影響はありません。これに対してブルー光は光路差により ΔW の波面収差が発生し図2のように波面に段が付きます。この ΔW により位相差が発生し回折が発生しますその結果回折光は主光線に対して $\pm \Delta \theta$ の角度をもった光線としてレンズを透過し網膜に到達します。この回折光は回折効率 η 分のエネルギーを持って網膜に到達しますが、 $\Delta \theta$ 分の収差として集光面積の拡大が生ずることになります。

1.2 結像のイメージ

前述のような原理によりどのように結像されるかを図3により説明します。

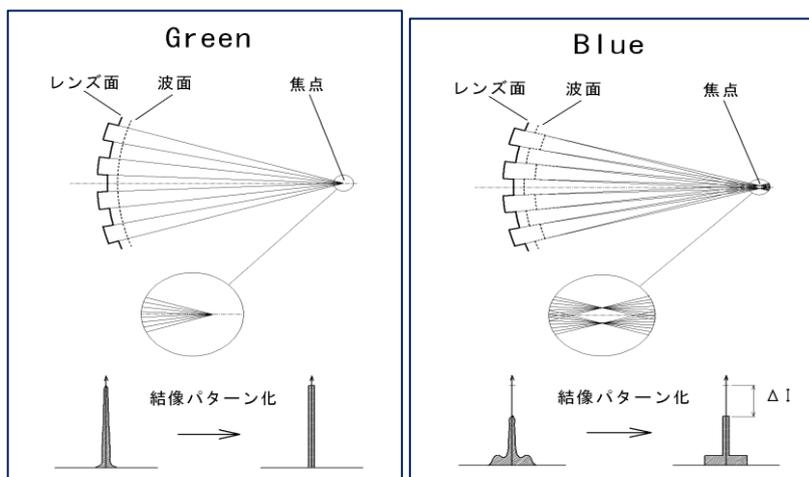


図3. 結像のイメージ

グリーン光の場合は収差が発生しない状態なので通常の結像と同じように結像し解像度は変わりません。これに対してブルー光は段差のエッジに於いて本来の進行方向と $\pm \Delta \theta$ の方向に分かれて光線が進みます。この結果網膜上では本来の結像と回折光による映像が重なり、像の強度分布が図3のようにはっきりした像の回りにぼけた像が裾野のように現れます。前述の回折効率によりこの裾野のエネルギーが決まりますがこの分が本来の結像強度から低減します。図3に於いて本来の強度から ΔI だけ低減されることになります。

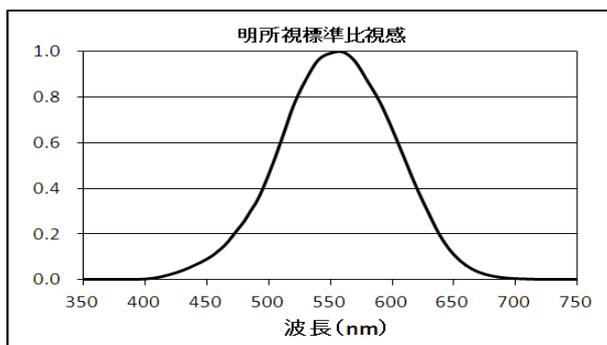


図4. 明所比視感度曲線

図4の比視感度曲線から、グリーン光 ($\lambda = 550\text{nm}$) の感度を 1.0 とすれば、ブルー光 ($\lambda = 440\text{nm}$) は 0.06 であり解像力を表す MTF への影響は小さいと考えられます。なお、レッド光として $\lambda = 650\text{nm}$ の影響度は 0.11 とブルー光より大きいですが、位相差が小さくなるので集光面積の拡大量も小さく、結果としてグリーン光が解像度を支配するようになります。

以上の結果、視力校正に関わる屈折力や解像度には影響を及ぼさずに、眩しさを感じないが刺激の強いブライトスポットのピーク強度低減を実現する要素が得られます。

1.3 位相差回折と色収差の違い

前述のように位相差が発生したときのブルー光の集光面積の拡大は水晶体や眼鏡レンズにより発生する色収差のボケと似た傾向にあります。決定的に異なるのは位相差回折による像の裾野の広がり。色収差のそれよりも遥かに大きく、大きなエネルギーであることです。

これはレンズ材質と位相差回折の分散の違いが関連します。分散を表す数値としてアッベ数 ν が使われますが、この値が大きいほど分散が小さい、すなわち色収差が小さいことを意味します。光学材料とアッベ数の比較は次の通りです。

- レンズ材料のアッベ数：60～24 程度
- 回折光学系によるアッベ数：-3.5

この数値から解るように位相差回折による光の曲がりかたは光学材料のそれより遥かに大きく、その結果集光面積の拡大量が大きくなります。また、像の裾野の広がり。図1のピッチ P、パターン凹凸の面積比、位相差の次数 m により異なり、設計の自由度が大きいことも特徴です。

IV. RAP 加工

RAP 加工とは「Ray Adjust Point」の略であり、前項までの原理に基づき位相差パターンを形成し、かつ、量産に於ける課題を解決する加工方法です。

(1) 特殊な加工方法を確立しレンズの生地に直接位相差パターンを形成

(2) 位相差パターン形成後ハードコート加工を行い、段差を埋めることにより段差による乱反射を防止

レンズ生地に直接位相差パターンを加工しその上にハードコートを施したことで、耐久性と信頼性の確保。

(3) 回折効率の最適化

回折効率については、空気中（屈折率 $n=1.0$ ）に最適化した位相差パターンでは、回折効率が一義的に決まるので、2次、3次回折光が残る状態となりますが、位相差パターンを異なる2種類の屈折率構成することで、回折効率が大きくなる過ぎることを防止する効果。

3. 製品としての拡張仕様

従来の研究開発を通して、僅か数%の光の吸収をもつ染色レンズであっても、機能レンズと組み合わせるとその効果が増幅される例が多いことを経験しています。レブラ社では当該製品の応用として、薄い染色レンズもラインアップを加えることで選択肢が広がるような製品構成を用意しました。

考察

1. 所望の性能

本製品開発の最も重要なテーマである、眩しさの原因となるブライトスポットのピークエネルギーの低減については所望の性能を実現しています。

参考文献

1. 三島濟一他著、「眼の辞典」朝倉書店、2004年
2. Bernard Kress 著、小舘香椎子監訳、「デジタル回折光学」丸善出版、2005年
3. 応用物理学会日本光学会光設計研究グループ監修、「回折光学素子入門」オプトロニクス社、2006年
4. 牛山善太著、「波動光学エンジニアリングの基礎」オプトロニクス社、2005年
5. 小舘香椎子、神谷武志監修、「回折光学素子の数値解析とその応用」丸善出版、2011年