フレネル膜プリズムの視機能への影響について

鶴留 康弘¹⁾・阿曾沼早苗¹⁾・小嶋 由香¹⁾・中前 美佳¹⁾
金山 素子¹⁾・藤木かおり¹⁾・天野 大輔¹⁾・岡 知子¹⁾
大澤 結¹⁾・高田 雄介¹⁾・別所建一郎²⁾・不二門 尚¹⁾

¹⁾ 大阪大学

²⁾ 淀川キリスト教病院

Effect of the Fresnel membranous prism on the visual function.

Yasuhiro Tsurudome¹⁾, Sanae Asonuma¹⁾, Yuka Kojima¹⁾, Mika Nakamae¹⁾
Motoko Kanayama¹⁾, Kaori Fujiki¹⁾, Daisuke Amano¹⁾, Tomoko Oka¹⁾
Yui Osawa¹⁾, Yusuke Takada¹⁾, Kenichiro Bessho²⁾, Takashi Fujikado¹⁾

¹⁾ Osaka University

²⁾ Yodogawa Christian Hospital

要 約

【目的】フレネル膜プリズムの視機能への影響を比較検討する。

【対象及び方法】対象は、視力や視機能に問題のない正常者9名9眼。年齢21～29 (24.8 ± 3.12) 歳、屈折度は $+0.5 \sim -5.0$ (-1.47 ± 1.63) D。完全矯正レンズ下の片眼に①6△②8△③10△④12△⑤15△⑥20△⑦30△の7種の膜プリズムを基底外方に貼付し、1、視力2、コントラスト感度(AULCSF)3、グレアテスト4、波面センサーによる眼球高次収差と、前方散乱係数(コントラスト法)を測定し、それぞれ膜プリズムの有無による比較を行った。また、5、自覚的装用感についてのアンケートも行った。

【結果】膜プリズム無しと比較して、1、2では8△以上の加入で有意な視力、AULCSFの低下($P < 0.01$)が、3のグレア下では12△以上の加入から有意な感度低下がみられた($P < \sim 0.05$)。また膜プリズム下でのグレアの有無による比較では、8△以上の加入でグレア有りの場合グレアなしと比べて有意に感度が低下していた($P = \sim 0.05$)。眼球収差では、総高次収差($C3+C4$)は12△と30△で有意に増加し($P < 0.05$)、前方散乱係数は12△以上の加入で有意な増加があった($P < 0.05$)。5では、プリズム度が大きくなるにつれ自覚的装用感が悪化した。

【結論】8△以上のフレネル膜プリズムを処方する際には視力、コントラスト感度、グレア、散乱などの視機能への影響を考慮する必要がある。

別冊請求先 (〒565-0871) 大阪府吹田市山田丘2-15

大阪大学医学部付属病院 眼科外来

Tel. 06-6879-5111 Fax. 06-6879-5476

E-mail: tsurudome@ophthal.med.osaka-u.ac.jp

Key words: フレネル膜プリズム、視力、コントラスト感度、グレア、前方散乱係数

Fresnel membrane prism, Visual acuity, Contrast sensitivity, Glare, Scatter index

Abstract

【Purpose】 To examine the effect of Fresnel prism on visual function.

【Subject and method】 9 eyes of 9 subjects without ocular abnormalities were examined . Age ranged from 21 to 29 years (24.8 ± 3.12 , average $\pm$ SD) and the refraction ranged from +0.5 to -5.0 diopters (-1.47 ± 1.63). Membrane prism was fixed on the full-corrected lens. The power of Fresnel prisms were ①6 ②8 ③10 ④12 ⑤15 ⑥20 ⑦30(Prism, Base out). We tested, 1: Full-corrected visual acuity, 2: Contrast sensitivity (Area Under Log Contrast Sensitivity Function, CSV-1000E), 3: Glare test (CSV1000-HGT) 4 : Root Mean Square (μ m) value of total ocular aberration (Coma like (C3) aberration , Spherical-like (C4) aberration, C3+C4) and scatter index (SI) by Wavefront analyzer (TOPCON KR-9000PW) 5: Questionnaires of visual quality with prism.

【Results】 Visual acuity and contrast sensitivity decreased significantly with prism 8 Δ or more as compared with no prism ($P < 0.01$). With glare light, contrast sensitivity decreased significantly with prism 12 Δ or more compared without prism ($P < 0.05$). Contrast sensitivity with glare light decreased significantly with prism 8 Δ or more compared with it without glare light ($P = 0.05$). C3+C4 increased with prism 12 Δ and 30 Δ significantly compared without prism ($P < 0.05$). SI increased significantly with prism 12 Δ or more ($P < 0.05$). The subjective visual quality decreased with the increase of the power of prism.

【Conclusion】 When we prescribe Fresnel membrane prisms with a power more than 8 Δ , we have to consider the deterioration of visual function such as visual acuity, contrast sensitivity, glare.

I. 緒 言

プリズムは光学的性質により、視軸の変更効果（運動面）と、複視の矯正や両眼視発達（感覚面）に使用されている。¹⁾ 臨床において、斜視、弱視、視野欠損などの光学的視能矯正に重用している。フレネル膜プリズム（以下膜プリズム）の材質である塩化ポリビニルクロライド（以下PVC）は、視力やコントラスト感度に影響を与え、歪みや色分散が起こることが報告されている。²⁾ そこで、今回我々は、視力、コントラスト感度、グレア、収差、散乱などの観点から、膜プリズムの視機能への影響を検討した。

II. 対象と方法

対象は、眼疾患がなく、正常な視力と視機能を有するボランティア9例9眼（男性2例、女性7例）、年齢は21歳～29歳（平均年齢 24.8 ± 3.2 歳）、屈折度数は+0.5～-5.0D（平均屈折度数 -1.47 ± 1.63 D）であった。通常プリズムは麻痺眼側に処方することから³⁾ 完全矯正下の片眼（非優位眼）に、3M Health Care社製6、8、

10、12、15、20、30（以下①、②、③、④、⑤、⑥、⑦）の7種類の膜プリズムを基底外方に貼付し、優位眼を遮閉し単眼視において膜プリズムが無い時と有る時の、視力、コントラスト感度、グレアテスト、Hartmann-Shack波面センサーによる眼球収差、前方散乱係数を測定して結果の比較検討を行った。また屋外と屋内での自覚的装用感のアンケートを行った。

コントラスト感度はVector vision社CSV-1000Eを用いて明所にて検査距離2.5mで測定した。この装置ではフェース部分の輝度は常に85cd/m²に自動補正される設定になっており、3、6、12、18cycles/degreeの周波数のコントラスト感度を測定することができる。各周波数におけるlogコントラスト感度より、MTF曲線で囲まれる部分の面積であるarea under the log contrast sensitivity（以下AULCSF）を算出し比較した。

グレアテストは、CSV-1000にハロゲンライトを取り付けた装置であるCSV-1000HGTを用いて、暗室にて縞視標チャートであるCSV-1000Eを2.4mの距離で測定した。グレア刺激が無い時と、最大グレア負荷の条件下で6cycles/degree

のみのコントラスト感度を測定し、logコントラスト感度を算出した。背景輝度は114cd/m²に固定され最大グレア時の光度は29万cd/m²であった。

眼球波面収差は、TOPCON社 Wavefront analyzer KR-9000PW波面センサーを用い暗所にて測定した。収差量は、計測した波面をZernike展開して得られた係数の2乗の総和を求め、その平方根root means square (RMS)として表示した。瞳孔系4mmにおける、総高次収差(C3+C4=コマ様+球面様)、コマ様収差(C3)、球面様収差(C4)それぞれのRMSを計測し、散乱の定量法として、KR-9000PWに搭載されているコントラスト法⁴⁾による前方散乱係数測定プログラムを用いた。

コントラスト法による前方散乱係数とは、Hartmann像の中央4mm領域の点像(12個)について、周辺0.6mm領域の背景との輝度を比較し、12点分の平均を算出した数値であり、Hartmann像から、ぼやけをパラメータ化したものである。散乱係数は、コントラストの逆数であるため、値が大きいほど前方散乱が大きいことを表す(図1)。

検討にあたり、膜プリズムにより角膜頂点が偏心されるため角膜系の収差の検討は除外した。また、矯正レンズによる眼球全体の収差、前方散乱係数値への影響はなかった(Paired t-test)ことを記しておく。

図1 前方散乱係数(コントラスト法)

コントラスト法による前方散乱係数は、Hartmann像の中央4mm領域の点像(12個)について、周辺0.6mm領域の背景との輝度を比較し、12点分の平均を算出した値である。最低輝度(I_{min})は収差の影響はないと考えられている。コントラストの逆数をとるため、値が大きいほど前方散乱が大きいということになる。

自覚的装用感については、晴天時の屋外(12時から15時)と、屋内の視力検査室内における装用感について尋ねた。感想の多かった、「ぼやけ、反射、像の湾曲・歪曲、色の出現、空間定位の誤認」の5項目を抽出し、膜プリズムの度数ごとに、「1感じない、2やや感じる、3感じる、4明らかに感じる、5強く感じる」の5段階にわけて評価を行った。実際の処方子どもが対象であることも多く、膜プリズムの光学的補正以外の効果(見え方)についての自覚的な評価は聞き出せないことが多い。今回はこの変化につき改めて自らで確認し、その知見を生かしたいと考え検討した。

統計学的解析は、One Way ANOVA repeated measure、Wilcoxon Signed Rank Test、Paired t-testで検討をおこない、P<0.05を有意とした。

Ⅲ. 結 果

1、視力

膜プリズム無しでの矯正視力は全例log MAR-0.18であり、膜プリズム装用においては、①-0.13②-0.04③0④0.06⑤0.19⑥0.28⑦0.42であった。膜プリズム無しと比較して②(8△)以上の加入において有意な視力低下がみられた(P<0.01, One Way ANOVA repeated measure)(図2)。

図2 視力の比較

視力はlog MARで表している。プリズム無しと比較して、8△以上の膜プリズム装用において有意に視力が低下した(P<0.01, One Way ANOVA repeated measure)。

2、コントラスト感度

膜プリズム無しでのAULCSFは1.54であり膜プリズム装用下では①1.45②1.38③1.3④1.27⑤1.22⑥1.1⑦0.97であった。②（8△）以上の度数において、有意なコントラスト感度の低下が

図3 コントラスト感度（AULCSF）の比較
プリズム無しと比較して、8△以上の膜プリズム装用において有意にコントラスト感度が低下した（ $P < 0.01$, One Way ANOVA repeated measure）。

みられた（ $P < 0.01$, One Way ANOVA repeated measure）（図3）。

3、グレアテスト

グレア刺激下における、膜プリズム無しと、各膜プリズム装用下でのlogコントラスト感度の比較を示す（図4-a）。グレア刺激負荷後、膜プリズム無しのlogコントラスト感度は、1.89であり、膜プリズム装用においては①1.87、②1.74、③1.57、④1.43、⑤1.11、⑥0.97、⑦0.74であった。比較すると、④（12△）から有意なlogコントラスト感度の低下がみられた（④ $P < 0.05$ 、⑤⑥⑦ $P < 0.01$, One Way ANOVA repeated measure）。次に各プリズム度数における、グレア刺激前後のlogコントラスト感度を比較した結果を示す（図4-b）。グレア刺激無しの膜プリズム無しのlogコントラスト感度は1.97で膜プリズム装用においては①1.97、②1.91、③1.76、④1.76、⑤1.62、⑥1.52、⑦1.26であった。比較すると、②（8△）から有意な低下がみられた（②③④⑤ $P = 0.05$ 、⑥⑦ $P = 0.01$, Wilcoxon

図4-a グレア刺激負荷後のコントラスト感度の比較
グレア刺激負荷後、プリズム無しと比較して、12△以上の膜プリズム装用において有意にコントラスト感度が低下した（④ $P < 0.05$ 、⑤⑥⑦ $P < 0.01$, One Way ANOVA repeated measure）。

図4-b プリズム装用下における、グレア刺激前後のコントラスト感度の比較
各プリズム装用下における、グレア刺激前後のコントラスト感度は8△以上において有意な差がみられた（②③④⑤ $p = 0.05$ 、⑥⑦ $P = 0.01$, Wilcoxon Signed Rank Test, Paired t-test）。

Signed Rank Test, Paired t-test)。

4、Hartmann-Shack波面センサー

10△装用下の一例を図5に示す。マイヤー像

は、プリズムと矯正レンズの反射がみられリングが完全に投影されていない箇所がある。角膜の収差は除外した。Hartmann像は、ぼやけて

図5 10△の膜プリズムを基底外方に装用した時の波面センサー画面
左上のマイヤー像は、膜プリズムと矯正レンズの反射のためリングが完全には映っていない。角膜の収差は除外した。Hartmann像はぼやけており、またドットの形状、輝度がばらついている。

図6 眼球全体のRMS（コマ様+球面様、コマ様、球面様）の比較
プリズム無しと比較して、コマ様+球面様収差のみ12△と30△装用下で有意に収差が増加した（ $P < 0.05$, One Way ANOVA repeated measure）。

図7 前方散乱係数の比較

プリズム無しと比較して、12Δ以上の膜プリズム装用において有意に散乱係数が増加した（ $P < 0.05$, One Way ANOVA repeated measure）。

図8 自覚的装用感

屋外、屋内での装用感を「1 感じない、2 やや感じる、3 感じる、4 明らかに感じる、5 強く感じる」の5段階で評価を行った。数値が大きいかほど違和感強いことを表す。屋外、屋内ともに③～④（12Δ～15Δ）あたりから、違和感が出現しはじめ、⑦（30Δ）では強い違和感が訴えられた。

おり、ドットの形状、輝度がばらついていた。

眼球全体のRMSを膜プリズム無しと比較すると、コマ様+球面様収差において④（12Δ）⑦（30Δ）のみに有意なRMSの増加がみられた。コマ様のみ、球面様収差のみでは有意な差は認

められなかった（ $P < 0.05$, One Way ANOVA repeated measure）（図6）。

膜プリズムなしの前方散乱係数は、 -0.09 ± 1.635 で散乱が低いことを示す。装用下では① 0.88 ± 1.63 ② 1.09 ± 1.53 ③ 1.23 ± 0.81 ④ 1.88 ± 1.69 ⑤

2.40 ± 1.55 ⑥ 1.85 ± 1.51 ⑦ 2.45 ± 1.33 であった。膜プリズム無しと比較すると、④(12△)以上において有意な増加がみられた($P < 0.05$, One Way ANOVA repeated measure)(図7)。

5、自覚的装用感

屋外、屋内の装用感の評価を示したグラフを図8に示す。膜プリズムの度数が強くなるにつれ、全ての項目での装用感の悪さが増している。5段階中、3以上を示したのは、屋外、屋内ともに③~④(12△~15△)あたりからであった。また⑦(30△)ではほとんどが最も悪い5を示していた。

IV. 考 按

フレネル膜プリズムはその光学的特性から視能矯正に頻繁に利用されるアイテムである。長所は多いが、意図に反して視機能を低下させてしまう短所も持っている。どの程度の度数でどのような視機能の低下がおこるのであろうか。今回我々は、フレネル膜プリズムが視機能に及ぼす影響について、いくつかの観点から検討を行ってみた。

視力、コントラスト感度は、膜プリズム無しと比較すると、②(8△)から有意な低下がみられた($P < 0.01$)(図2, 3)。過去の報告では、Veronneau-Troutmanが「12△以上で有意な視力の低下が起こる」²⁾Katzは、「20、30、40△を装用した例では、有意な視力低下をきたす。またAULCSFにてコントラスト感度の低下が起こる」と述べている⁵⁾。またWoolは、「膜プリズムのPVCの色分散が原因で、10△以上で十分に視力、コントラスト感度が低下する。また空間周波数ごとに比較すると、低周波数領域では、変化はさほどないが、15△以上で高周波数領域のコントラスト感度が低下する」と報告している⁶⁾。視力やコントラスト感度が低下する膜プリズムの度数について、今回の我々の結果と概ね一致すると考えられる。高周波数域のコントラスト感度は視力との相関が高いが、今回、低~中間周波数域である6cycles/degreeにおいても、コントラスト感度の低下がみられたことから、膜プリズム装用時のコントラスト感度を

確認する重要性が示唆された。また、自覚的装用感として「ぼやけ」が被験者全員から訴えられたが、これは、膜プリズムの度数が大きくなることにより、視力とコントラスト感度が低下することが、ぼやけの自覚に反映されていると考えられた。

膜プリズム装用下での高次収差について、波面センサーを用いて解析を行った結果、④(12△)と⑦(30△)のみで、コマ様+球面様収差において有意な増加が認められただけであった(図6)。膜プリズムがあることで、RMSの増加はみられるが、プリズム度数とRMSに有意な相関はなかった。プリズムによる収差は1次の低次収差の範囲内であることが理想的であるが、波面センサーで測定された2次以上の高次収差には特定の傾向は見られなかったことから、膜プリズム装用における高次収差の影響はほとんどないと考えられた。

グレアテストや前方散乱係数と、「反射して見える」という自覚的な感想から、光の反射、散乱について考えてみる。まず反射を訴えることは、Veronneau-Troutmanの「プリズムの臨界角(全反射を起こす最小の入射角)を通過すると光は減少するが、他の入射角からは多くの光を受ける」²⁾との報告や、臨界角を越えると光は境界面で全て反射される⁷⁾性質があることから、説明することができる。

グレアテストでは、グレア刺激負荷後のlogコントラスト感度を、プリズム無しと比較すると、④(12△)以上では有意な低下がみられた(④ $P < 0.05$ 、⑤⑥⑦ $P < 0.01$)。膜プリズム装用下でグレア刺激前後の比較をすると②(8△)から有意な低下がみられた(②③④⑤ $P = 0.05$ 、⑥⑦ $P = 0.01$)。CSV-1000HGT測定中、光の散乱や反射で、縞視標がかくれてしまうことがあった。検査中は、被検者に、head tiltなどさせて最大限見える努力を促して測定した。しかし膜プリズムの度数が大きくなるにつれ屈折角も大きくなり、主断面も増えることで反射が増加し、結果としてコントラスト感度が低下したと推察される。

次に、散乱についてだが、膜プリズム装用下のHartmann像は背景が明るく、点像がぼやけ

ている例が多かった。三橋らはHartmann像の点像のぼやけから散乱を検証し、「瞳孔系4mmの前方散乱係数は、白内障群 (5.04 ± 3.06) では、正常群 (1.57 ± 0.56)、円錐角膜群 (1.83 ± 0.79) よりも、前方散乱係数が大きく、高次収差と、光散乱には相関がない」⁵⁾と報告した。今回の検討によると、多少のばらつきはあったが、④ (12 Δ) から有意な増加を認めた ($P < 0.05$)。この方法では背景輝度を比較しているため、収差に関係なく測定ができることから、膜プリズムにより散乱が生じていると考えられる。しかし、散乱についての確定的な評価法はないため、他の評価法も必要だと思われる。また、最も大きい30 Δ 加入でも散乱値は 2.45 ± 1.33 であり、程度の差はあるが白内障眼ほどの散乱の増加は見られないようである。この散乱が視機能にどう影響するのか。症例は異なるが、過去に関本らの「白内障眼において最大グレア刺激により強い散乱が起こればコントラスト感度が低下する」⁸⁾との報告や、不二門らは「白内障眼の前方散乱係数、後方散乱係数、高次収差が、眼球光学系の劣化に関係する」⁹⁾と述べている。これを受けて、散乱がコントラスト感度の低下やその他の視機能に関係することは矛盾しないと考えられる。

膜プリズム装用下で、建物や足元のタイルが歪んだり、拡大されて見えたこと、視線を変えることにより、湾曲の程度が頂点と基底で異なっていた。また度数が大きくなるにつれ、変化が増していった。これらは、Ogleの5つの歪み(水平方向への拡大、垂直線の湾曲、非対称な水平方向への拡大、垂直方向への拡大、側面の角度における垂直方向の拡大の変化)¹⁰⁾と一致していた。これらの違和感が視力やコントラスト感度などといった視機能にどう影響しているかは不明だが、像の湾曲、歪曲、拡大が生じることにより、例を挙げると歩行やデスクワークなどにも支障が生じることが推察される。また、悪心、頭痛、疲労を自覚する感想もあったことから、見え方以外にも影響を及ぼすことが、考えられた。

色の出現は、光の波長により屈折率が変化する分散によるもの⁷⁾である。物体の基底側は黄

色に見え、頂点側で青く見えたという感想も分散とスペクトルの関係から、説明することができる。中村は「色分散はプリズム度とアッペ数に関係し、MTFが低下する。」¹¹⁾と報告している。色分散量に関しては、検討していないため今後の研究課題とする。

総括すると、膜プリズム (PVC) は、②8 Δ 以上の負荷で視力、コントラスト感度を低下させ、12 Δ 以上になるとグレア感度も低下した。また、ぼやけ、反射、像の湾曲・歪曲、色の出現、空間定位の誤認など見え方に変化を及ぼし、膜プリズムの度数が大きくなるほど、悪化する。これらは、過去の報告と同様であり、他覚的な結果と自覚的な感想が一致していた。そして、新たに高次収差には影響がほとんどないこと、グレアテストにより反射が、また波面センサーにより前方散乱が12 Δ 以上の負荷において視機能低下に影響していることが示された。

今回は膜プリズムを非優位眼に貼り、単眼視における視機能の影響を検討した。臨床現場において膜プリズムを処方する際は両眼視の状態を把握することが重要であり、装用可能なプリズム度数もさまざまである。今後は今回の知見を臨床で活用し検討を続けていく予定である。

参考文献

- 1) Suzanne Veronneau-Troutman, 不二門尚, 齊藤純子訳: プリズムと斜視, 83-84文光堂, 東京, 1998
- 2) Suzanne Veronneau-Troutman: Fresnel prism and their effects on visual acuity and binocularity. Trans Am Ophthalmol Soc 76: 610-653, 1978
- 3) 矢ヶ崎悌司: プリズム処方のための検査, 丸尾敏夫 (編): 眼科プラクティス5, 190-194, 文光堂, 東京, 2002
- 4) Mihashi Toshifumi, Hirohara Yoko, Bessho Kenichiro, Maeda Naoyuki, Oshika Tetsuro, Fujikado Takashi: Intensity Analysis of Hartmann-Shack Images in Cataractous, Keratoconic, and Normal Eyes to Investigate Light Scattering. Japanese Journal of

- Ophthalmology. (0021-5155) Vol. 50, 4号, 323-333, 2006
- 5) Milton Katz : Visual acuity through Fresnel, refractive, and hybrid diffractive/refractive prism. Optometry. 75, (8), 503-511, 2004
- 6) George C. Woo, Fergus W. Cambel : Effect of Fresnel prism dispersion on contrast sensitivity function. Ophthalmic Physiol Opt. Vol. 6, No4, 415-418, 1986
- 7) 西信元嗣：眼光学の基礎．反射と屈折 2 - 5, 金原出版株式会社, 東京, 1990
- 8) 関本紀子, 阿曾沼早苗, 岡井佳恵, 田中仁菜, 水野真由美, 不二門尚, 他：グレア光照射の瞳孔系及び、コントラスト感度に与える影響．日視会誌 32巻：109-113, 2003
- 9) 不二門尚, 前田直之：眼科検査診断法 新しい視機能評価システムの開発．日眼会誌 108巻 12号：809-822, 2004
- 10) Ogle KN : Distorsion of the image by ophthalmic prisms. Arch Ophthalmol 47 : 121-131, 1952
- 11) プリズム色分散によるMTFの低下についての研究 www1.ocn.ne.jp/~shojido/pages/prism/prism.htm
-