

視機能からみた将来のディスプレイ

畑田 豊彦

東京工芸大学工学部光情報メディア工学科

The Future Display Considering Human Visual Function

Toyohiko Hatada

Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University

視覚情報社会の発展とともに、高精細映像で自然な空間が再現でき、眼や身体に優しいディスプレイが期待されている。その実現のために、人間の空間情報受容特性を満足させるディスプレイ条件を整理し、表示面を感じさせない今後の表示技術の可能性を調べる。
(視覚の科学 24: 68-75, 2003)

キーワード: 高精細度画像, 三次元ディスプレイ, 高臨場感ディスプレイ, 視機能, 空間視

Key Words: High definition images, Three dimensional display, Hyper realistic display, Visual function, Space perception

1. はじめに

いつでもどこでも情報交換ができるモバイル型情報端末の普及や、大画面ディスプレイによる迫力ある映像が楽しめるホームシアターの出現など、高密度・高画質な視聴覚情報を利用するシステムが急速に拡がりはじめている。事務用情報端末 (VDT) が出現したときと比べ、情報を利用する状況も多様化し、より見やすく使いやすい表示条件を見出す必要が改めて出てきた。

ここでは、様々な情報利用条件での視覚情報処理能力 (視機能) を調べ直し、これからのディスプレイに必要な条件を整理するとともに、今後、より望ましい情報利用環境を作り出すための問題点をまとめる。

2. 将来期待されるディスプレイ

利用情報の高密度化やモバイル化に伴い、人間の情報処理能力や利用目的などを考慮し、次のような表示性能をもつディスプレイの出現が期待されてい

る。

1) スクリーンフリーで眼に優しいディスプレイ

表示面を感じさせず、周囲光による妨害 (反射) も少なく、人間の弁別閾 (視力や明暗・色、ちらつきなど) よりも高密度な映像情報を提供し、利用者の機能に整合して、眼への負担が少ない表示条件を満たす。

→表示面を感じさせないディスプレイの例として、装着型ディスプレイ (head mounted display 以下 HMD) が商品化されているが、画質面の不十分さや装着時の圧迫や拘束感を感じるため、表示デバイス素子の高精細化、観察動作と融合した軽量観察光学系と装着構造での改良点が残されている。

一方、環境条件に順応した眼に優しいディスプレイの目標として、使い慣れた紙が挙げられる。フレキシブルな液晶や electro luminescence (電界発光以下 EL) などで動画表示もできる紙に替わるディスプレイ開発が進められているが、より軽量・柔軟で、高画質な表示への性能向上が期待されている。

別刷請求先: 243-0297 厚木市飯山 1583 東京工芸大学工学部光情報メディア工学科 畑田豊彦
(2003年10月20日受理)

Reprint requests to: Toyohiko Hatada Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic Univ
1583 Iiyama, Atsugi 243-0297, Japan
(Received and accepted October 20, 2003)

2) 三次元空間を再現するディスプレイ

思わず触れてみたくなる映像によって、自然で臨場感溢れる三次元空間が再現でき、表示された対象を利用者が自由に処理・加工できる作業環境システムを作り出せる。

→空間を知覚する人間側と各種ディスプレイ方式との関係は、後でも述べるが、昔から幾度となく注目を浴びながら、それほど定着しない2眼式立体ディスプレイは、立体像の歪みや違和感による眼への負荷をまず軽減することが必要である。更に、立体情報が有効に利用できる対象(遠隔手術・作業用観察操作システム、医療診断用画像、体験型訓練・学習シミュレータや娯楽用など)を見出すことも、今後のディスプレイとして定着する重要な課題である。

現状では、イベントやテーマパークでの大画面2眼式立体ディスプレイは一時的な人気を呼び、表示方式としては、眼鏡装用型(偏光フィルタ眼鏡や切り替えシャッタ眼鏡など)と特殊スクリーン型(蒲鉾型レンズや複眼レンズのような微小光学素子を多数配列した指向性スクリーン)が用いられている。観察時に特別な装具を必要としない後者の方式が望ましいが、観察位置と人数の制約、画質面での改善などが残されており、多方向からの映像を高密度・高精度に制御ができる新しい立体用スクリーンの開発が待たれる。

以下に、このようなディスプレイに要求される表示条件について、利用者側の視覚特性を改めて見直し、望ましい表示条件を検討整理してみる^{1,2)}。

3. 視覚特性からみた次世代ディスプレイの表示条件

1) 忠実再現に必要な表示条件

観察距離や情報内容により、ディスプレイの望ましい表示条件も変化する、必要な表示情報量も決まってくる。

(1) 視機能への負担が少ない観察距離と画面配置

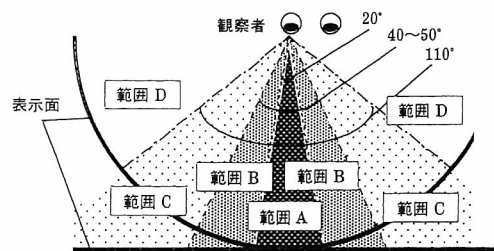
手元で作業するのに、明視距離 25 cm が推奨されるが、眼に負担が少ない距離というよりは、光学計算上、逆数でも使いやすく設定された距離のようである。調節や輻湊機構への負担が少なく、画面への操作性なども考慮すると、40~70 cm が作業しやすい近距離範囲になる。また、作業対象から水平方向 $\pm 15^\circ$ 、垂直方向の上 8° 、下 12° の範囲内は無理なく情報を受容できることから、必要な情報対象はこの範

囲に提示すると作業が楽にできる。情報提示面の角度も、物理的垂直から観察者の前傾姿勢に約 5° 加えた角度で後方に傾けた画面配置が見やすくなる。

このような作業条件に対して、写真や絵画を觀賞する場合は、手に取って画像の細部に注目して見ると、離れて画像全体を見るのでは、画像から感じる印象も変化する、関連する視覚特性も異なる。前者のごとく注視する場合は視機能の閾値(視力など)が、後者の場合は、実際に見ている視野の広さと情報受容特性に関係し、見込む画角が 30° (画面横幅の約2倍の観察距離)以上になると、画像から迫力や臨場感を感じはじめる。

このように広い視野からの影響は、視機能の優れた中心視野(5° 以内)に加えて、運動情報や空間的な拡がりをも有効に利用する周辺視野($20^\circ \sim 110^\circ$ まで)に映像を提示すると、観察者が映像空間と融合したように感じ、映像の動きに応じた身体動揺(図1)が誘導発生する。

ホームシアターのように、大画面に映像を表示する場合は、ピント調節や輻湊での変動量の影響が少なくなる 200 cm 以上が観察距離として望ましく、しかも、この観察距離で画面の横サイズが 100 cm になると、見込む角度も 30° 近くになり、臨場感を感じはじめる。より自然で自由に映像を楽しむときは、更に広い 100° 近い視野角の映像が再現できる大型スクリーンが必要になる。このようなリラックス状態で



範囲A: 20° 以内
身体動揺が生じにくい範囲
範囲B: $20 \sim 50^\circ$
2D 映像視聴時と 3D 映像視聴時とあまり差がない範囲
範囲C: $50 \sim 110^\circ$
3D 映像視聴時の方が身体動揺の大きい範囲
範囲D: 110° 以上
身体動揺が飽和する(画角により身体動揺が変わらない範囲)

図1 平面(2D)映像と立体(3D)映像によって観察者に身体動揺が発生する視野範囲

は、観察姿勢はやや後傾となり、表示面と視線が直交しない場合が多くなる。その際、観察方向が表示面と45°以上になると、画像が不自然に見えるため、長時間観察時にはスクリーンの設置状態が見やすさや眼への負荷に影響を与える。

(2) 観察距離や注目度に応じた高密度画像（解像度）

観察距離によって、高画質に見える画像の構成最小素子サイズ（画素、テレビでは発光する蛍光体やピクセル、ハードコピーではインクドット）も変化する。手元での観察距離（40 cm）では、通常視力1.0の人は0.1 mmの空隙でも識別でき、注意深く観察する場合は、0.05 mm程度の微妙な変化も見分けられる。視機能の場合は、線を見込む角度（視角）やその逆数で弁別閾を示す場合が多いが、ディスプレイ分野では、表示面上1 mmに何本の線が表示できるかを示す本/mmで解像度を表現する。手元作業の距離（40 cm）では、通常視力に耐えられる画像としては20本/mmよりも細かな表示ができることが要求される。

身近にある情報媒体の解像度は、新聞で約12本/mm、写真グラビアで約25本/mm、また、観察距離が2 m近くなる家庭用テレビでは2本/mmしかなく、ハイビジョンテレビでも4本/mmと、通常視力のぎりぎりで満足している状態である。

ここでいう通常視力とは、様々な方法（図2）で調べられる視力のうち、最小分離閾（2点または2線が分離して見える最小間隔）をいい、条件がよいと、視角30秒（視力2.0相当）でも識別できる。このときの視角1分は、網膜上では約4 μ mになり、視細胞約2個分に相当する。

通常視力以外に、最小視認閾（均一な部分に発生する変化や欠損を見つける能力で、白地に黒点は視角3秒（視力20.0相当）、黒地に白点は視角1秒（視力60.0相当）、線では視角0.5秒（視力120.0相当）でも検出できる。ただ、均一部分が少ない一般画像では、これらの値の約1/10に低下すると最小識別閾（直線部分のズレに気付く能力で、副尺視力ともいい、視角2~10秒（視力30.0~6.0相当）のズレを見つけ出す）があり、通常視力と比べると、非常に細かく微妙な変化を弁別する能力をもっている。

また、実際の識別能力を示す最小可読閾（文字（平仮名、漢字など）や記号図形（%、手指型など）が判別できる能力をいい、視角40~60秒（視力1.5~

1.0相当）程度）があり、家庭用テレビでは、通常視力や可読閾から、画像の構成画素や走査線などが目立たない距離を推奨観察距離としている。文字の構成線分などから、表示文字や記号の全体サイズとして視角約16分は必要で、より見やすい漢字の条件は、判別能力よりも約2倍の文字高が要求される。簡便な表示性能のチェック法として、数字1と英小文字エル(1)、英大文字アイ(I)とが区別できることが条件になっている。

急速に普及しつつある小型携帯端末は、画面サイズや表示文字などが小さく、かなり近い距離で見なければこの条件から外れてしまう。更に、操作による表示部への影響も考慮すると、視機能への負荷や操作性の両面から、適正な形状・表示条件を見直す必要がある。

最近、デジタル映像の表示情報量を、映像全体を構成する画素数で表現する場合がある。人間の網膜全体の視細胞総数約1億3千万個（黄斑部には約1千万個）と比べ、現行のテレビ方式（525 \times 700）では不十分で、高密度表示ができる画像QUXGA（quadruple ultra extended graphic array）では、通常使用されるSVGA（super video graphic array、600 \times 800画素）の縦横4倍の表示容量で、768万（2,400 \times 3,200）画素になり、注視近傍に限れば、かなり近いレベルになりつつある。また、視覚情報を大脳に伝達する神経束が約100万本に収束されていることから、瞬時に特定情報のみを見る場合は現状のデジタル画像システムでも十分といえるが、芸術工芸用の映像のように、副尺視力を忠実再現画像の評価基準にする場合はまだまだ不十分である。

(3) 微妙な刺激差が再現できる画像（階調、色調など）

高精細に加えて忠実な画像再現を実現するには、人間の明暗・色の弁別能力から、かなりの高密度で多量な画像情報が要求される。

(i) 階調（明暗の調子再現状態）

人間が安定して情報利用できる輝度範囲（図2）は3~500 cd/m²であるが、自然な画像として見るには、更に広い明るさの範囲の再現が要求される。明暗の再現状態を示すコントラスト比（画面内の（最大輝度/最小輝度）で示す値）も250~1,000になり、微妙な明暗差を識別する能力を情報量単位で表現すると、8 bitsは必要で、より自然な階調再現には10 bits以上が要求される。現行のディスプレイは、

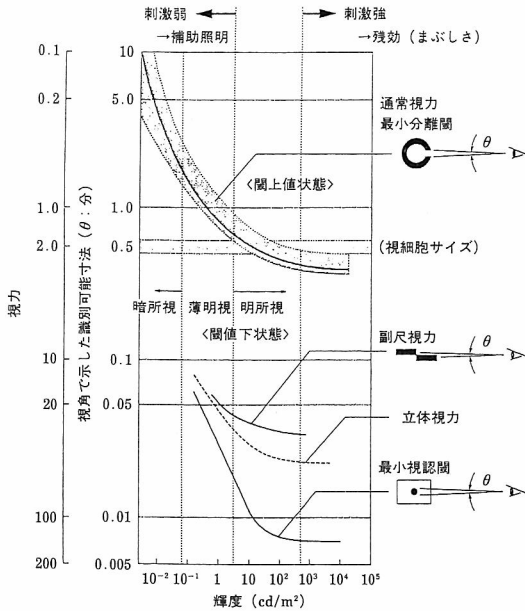


図2 測定時の明るさによる様々な視力の変動状態
 横軸：測定対象の明るさ（輝度単位，3～500 cd/m²の範囲では視機能が安定して働く。この範囲外では，明るいまぶしさなどの残効が発生し，暗い範囲では補助照明が必要となる）
 縦軸：識別できる対象を見込む角度（視角分単位）とその逆数になる視力値
 実線：上から通常視力（最小分離閾），副尺視力（最小識別閾），最小視認閾
 破線：立体視力（立体視に必要な両眼にできるズレ量（視差）の識別能力）

周囲照明と表示面の反射率から最低輝度 3～5 cd/m²，最高輝度 120～550 cd/m²（平均約 200 cd/m²）で，コントラスト比も 40～150 程度である。自然な感じを与える光沢の輝きや物体表面の質感，暗い部分での陰影などの微妙な再現が要求され，周囲の照明によるコントラスト低下を防ぐ反射防止法（現状の反射率の 1/3 以下）は，スクリーンフリーのディスプレイにするためにも，是非必要な条件である。

これに対して，高輝度（150 cd/m²以上），高コントラスト（10以上）表示の長時間観察になると，まぶしさや残効が発生して，眼には負荷になる。このため，眼に優しい表示として，80 cd/m²程度の表示輝度で，文字の見え方などに影響を与えない程度のコントラスト比 3 以上で，なるべく低いコントラストでのポジ表示（背景輝度の方が表示輝度より高い状態）が望ましいとされている。反射型情報表示で

多用されている印刷紙でも，特殊紙以外はコントラスト 5～10 以内である。

このように，高忠実・高品質映像と眼に優しい表示とは相反する条件になり，次世代ディスプレイでは表示内容，作業動作，使用環境に応じて，表示性能が調整・切り替えできる機能が必要条件になる。

(ii) 色調（色の再現状態）

現在，実用化されているカラーディスプレイは，人間の色知覚機構を利用して，3原色の混色による色再現方式を採用している。ただ，人間の色弁別特性からみると，現状の色再現方式では，彩度の高い鮮やかな色や，明るさレベルに応じた微妙な色の見え方の変化を満足に再現できていない。

そのためには，各原色での調子再現に必要な情報を現行の 7～8 bits から 10 bits まで増加させる必要がある。更に，色再現範囲の拡大のために，原色数を 3 原色から 4 原色（Red, Green, Blue + Magenta）や 6 原色（3 原色 R, G, B 各々を長波長成分と短波長成分に分割する方式，または Red-Cyan, Green-Magenta, Blue-Yellow の反対色対の各々を原色にする方式など）に増やす多原色方式で，より自然な色再現を目指すことになる³⁾。

(4) 安定した画像（画面切り替え周波数）

動画を表示するディスプレイでは，画面がちらつかず，滑らかな動きが再現でき，長時間の観察でも眼に負荷を与えない表示性能が要求される。とくに，画面切り替え周波数が問題で，現行のテレビなどは，小面積刺激での critical fusion frequency (CFF) 値（ちらつきを感じなくなる点滅融合周波数）から，60 Hz で画面を切り替えれば十分とされていた。

ところが，大画面を観察するときや様々な対象への視線移動が大きくなる場合は，ちらつきが目立ちやすくなる。そのような状態でも，ちらつきが見えず，定常的な刺激と同じ見え方になる高速点滅条件を調べると，70～90 Hz 以上の画面切り替え周波数 stable fusion frequency (SFF) が必要なのことがわかった（図 3）。

最近のビデオプロジェクトでは，原色画像を継時的に提示して高輝度カラー表示する方式が採用されているが，この場合も視線移動により，図形輪郭などに色ズレが発生し，それを低減するには 250 Hz 以上の高速画面切り替えが必要になることも判明した⁴⁾。

このように，注意深く見ないと点滅しているのに

気づかない光刺激（以前の蛍光灯照明など）でも、CFF以上の高速点滅にすることで、安定して見えるようになる。動画表示による眼への負荷を軽減する

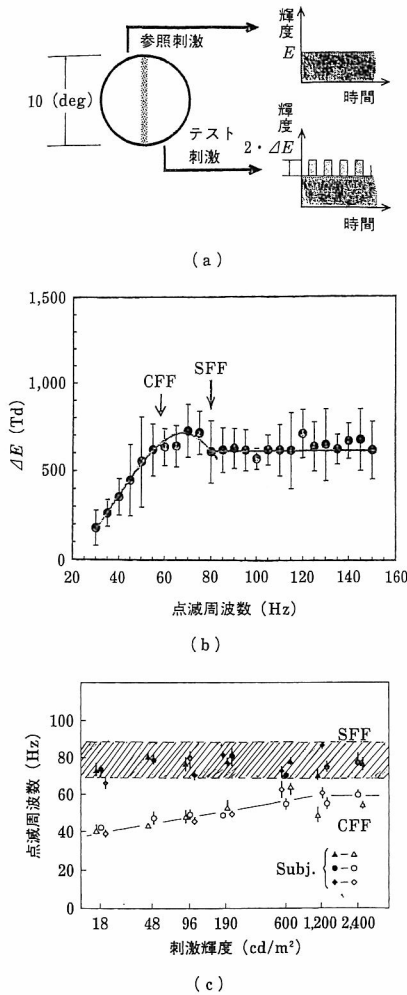


図3 ちらつきの臨界融合周波数特性 (CFF) と安定融合周波数特性 (SFF)

- (a) SFFの測定条件
定常的な光刺激に点滅光刺激を重畳して、微妙な明暗差が検出できる最小光量 ΔE を測定する。
- (b) 点滅周波数を変化したときの ΔE の変化
ちらつきが見えるCFFまでは上昇傾向を示し、CFF以上でもしばらく上昇するが、定常光刺激と同じように見えるSFF以上の高周波数点滅では一定値を示す。
- (c) 刺激輝度を変化したときのCFFとSFFの変化
CFFは刺激の明るさに比例して高くなり、画面の明るい部分などではちらつきが目立ちやすくなる。SFFは刺激輝度には関係なく、ほぼ一定の周波数域にあり、この点滅周波数域以上の光刺激では視線移動の影響や眼への負荷も少なくなる。

ためにも、高速切り替え映像によって長時間観察での疲労を少なくする表示条件が必要である。

2) 自然な三次元空間再現に必要な表示条件

大画面に高精細な映像を忠実に再現したとき、観察者は再現された対象を単に見ているだけでなく、思わず触れてみるか掴もうとしたくなる。そのような動作にも対応できるように、多方向から自然な三次元空間が観察できる表示システムへの展開が期待されている⁹⁾。

現在用いられる2眼式立体表示方式では、ある位置から見た両眼映像しか提示していないため、映像を表示するスクリーン面と立体像を表示する位置とが一致しない状態になる。それを調節-輻湊矛盾といい、違和感を与える原因の一つになっている。更に、書き割り効果（背景との前後位置はわかるが、顔や身体の微妙な凹凸が平面化して見える）や箱庭効果（立体に浮き出して見える対象が実際より小さく見える）、画枠による立体像の変形などの不自然な見え方も発生する。

このような不自然な空間再現を解決しないと、立体表示のもつ魅力が半減するため、次のような立体表示方式が検討されている⁹⁾。

(1) 多眼方式 (同時, 位置追従)

観察位置の移動に応じて、多方向からの映像を提示する方式で、同時に多方向映像を提示する方式と、観察者の両眼位置を追従して2方向映像を提示する方式とがある。この方式の移動間隔を非常に狭くして、片眼の瞳孔内にごくわずかな方向ズレの映像を複数以上提示する超多眼方式⁷⁾が提案され、2眼式の欠点である輻湊 (立体像) - 調節 (表示面) 位置のズレを解決する方式 (図4) として注目されている。実際、2眼式での立体の見え方と比べて、観察者のピント調節応答 (図4, 5) や主観評価結果から、安定した見やすい立体が再現できることが示されている。

(2) 空間 (中) 像方式

スクリーン上の像を観察する拡散像表示方式ではなく、光学系などを用いて空中に像を作る方式で、ピント調節への制約を少なくして、立体像を見やすくする。大型凹面鏡やMaxwell光学系 (観察者の瞳孔部で光束を絞り込んで像を投射する方式) を用いた実用例もある。装着型ディスプレイHMDもこの方式に含まれるが、装着時の違和感を低減・除去する工夫がどうしても要求される。

(3) 波面再生方式

コヒーレント光を用いて物体からの光の波面を再現するホログラフィは、空間再現方式としては理想的であるが、情報量が膨大で、高画質動画再生に必要な情報をどこまで圧縮して、時間の遅れなく伝達・提示できるデバイスとシステムの開発が課題である。

以上の方式に共通した課題は、動画（カラー）表示可能な小型高密度表示デバイスの開発で、現状ではプロジェクタ用などの液晶ディスプレイ liquid crystal display (LCD) を流用しているが、画素サイズや画素数でまだまだ不十分である。

超多眼方式を例に、情報量の面から実現性を調べると、視距離 600 mm にある対象から 2 方向の光束が瞳孔 (5 mm 径) に入るためには、約 0.23° 以下の間隔で映像を提示する必要がある。更に、観察者が水

平・垂直方向に ±125 mm 移動しても観察できるためには、50×50 の位置から、現行テレビと同等の映像を提示する必要がある、その情報量は次のようになる。

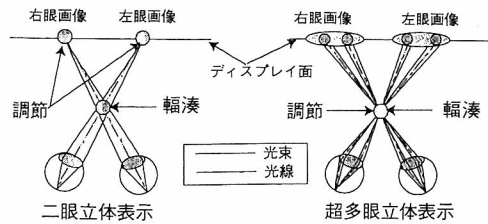
画面情報量 (480 画素×640 画素×8 bit 階調×3色)
×画面切り替え周波数 (30 Hz)

×観察範囲 (水平50視差×垂直50視差) = 50 Gbit/秒
現行テレビの情報量は約 200 Mbit/秒で、自然な立体表示には少なくとも約 3,000 倍の情報量が必要となる。ハイビジョンでも現在のテレビジョンに比べて 4~5 倍程度の情報量であることから、水平方向の移動だけを満足した立体映像では、情報量が 11 Gbit/秒に低減できる。更に、観察者の動きに追従する方式では、実現可能な 2.2 Gbit/秒程度に低減できる。

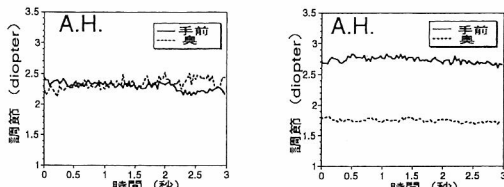
ここで観点を変えて、表示面を意識させないスクリーンフリーへの工夫について調べる。現在使用されているディスプレイのほとんどが平面スクリーンに映像を映し出す方式で、しかも表示面位置が意識され、実在感や臨場感のある空間再現にはマイナス効果になっている。これまでに、次のような方法で表示面の存在を弱める試みがみられる (図6)。

(a) 表面反射除去

ディスプレイ面からの反射を低減して、映像暗部の再現を向上させ、質感と奥行き感のある映像空間を作り出す。反射防止策 (反射防止膜、微小凹凸処理、表面貼付型レンズシート、ファバーフェイス



(a)



(b)

図4 二眼式と超多眼式による立体表示状態の相違と調節反応状態

(a) 両方式での観察者の瞳孔部への光束・光線の入射状態

二眼式では調節位置と輻湊位置とが一致せず、ディスプレイ面前後でピントが合う範囲 (被写界深度) 内では立体像は安定して観察できる。超多眼式では立体像の再現位置に調節・輻湊が合致し、ディスプレイ面や再現位置に関係なく、立体像が安定して見える。

(b) 両方式での立体像観察時の調節応答

超多眼条件では立体提示距離に応じて調節位置が変化するが、二眼式ではディスプレイ面 (45 cm) に調節位置が固定したままである。

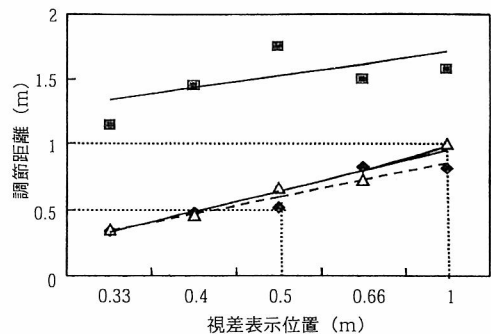


図5 立体像の表示状態によるピント調節への影響

◆：実際像, ■：拡散像, △：空中像

実際像と空中像は立体提示位置にピント調節が誘導されるが、スクリーンに投影された拡散像はスクリーン近辺に固定した状態で、調節-輻湊矛盾が発生している。

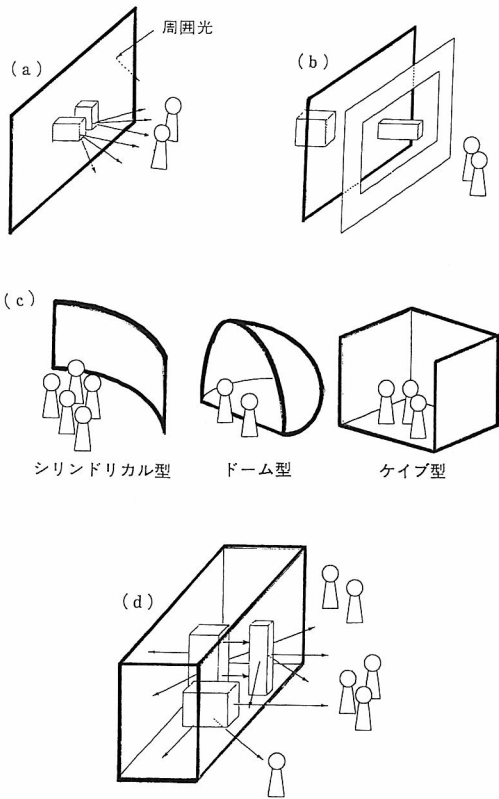


図6 表示面の存在を弱めて空間効果を生み出す方式
 (a) 表面反射除去：周囲光の表示面での反射を極力少なくし、表示画質の向上とともに、表示面位置を意識させない。
 (b) 仮想枠：表示面以外に画枠を設け、その枠を通して観察している状態を作り出し、表示面を意識させない。
 (c) 壁面取り囲み：画枠による視野制限を少なくし、視線や頭部運動による観察範囲も広くでき、映像空間と融合・没入した状態になる(シンドリカル型、ドーム型、ケイブ型、キャビン型のスクリーンが用いられている)。
 (d) 体積型空間表示スクリーン：空間に分布する発光体によって、空間像を表示する。イオンドープ型蛍石結晶、蛍光体を含む固体素子(小型)などが検討されたが、大型化は難しく、粉体スクリーンや多層発光スクリーンなどでの実用化が検討されている。

プレート、指向性制御素子)だけでなく、観察周辺の環境整備も必要で、映画館のような準暗室やHMDのような装着型もその効果を高める。

(b) 仮想枠

映画館の幕、薄型水槽のテレビ水族館のように、本来のディスプレイ面と異なる位置に映像を制限する枠を設けるだけで、平面映像にもかかわらず、か

りの奥行き感が生じる。立体映像でも画面枠で立体歪みが発生するが、仮想枠を設定することにより、不自然さが改善できる。

(c) 空中像

大型凹面鏡による空中像では表示位置を意識させず、奥行き方向に拡がりのある空間が作り出せる。器械近視の影響をなくす視機能検査装置として同様の表示方式(vision analyzer, Humphrey製)が開発されたが、検査占有空間のため現在はほとんどみられない。ただ、像観察時のピント調節測定では、空中像と実像とはほぼ同じ反応(図5)を示し、自然な空間を再現できる有力な方式である。空中像の空間深度の拡大や像面位置移動機構が簡便にできれば、既存の方式との併用で立体効果を高めることができる。

(d) 大画面

画枠などによる観察時の制約感が少ない大型映像では、取り囲み効果も加わり、ディスプレイ面の存在が弱くなる。それに映像空間と観察者とが一体化したように感じる融合感も発生することは、映画での大型スクリーン化で経験されている。大画面の形状(縦横比)も関係して、映画では、スタンダードサイズ(16mmフィルム1:1.33, 35mmフィルム1:1.37)から横長のシネマスコップ(1:2.35)や70mm映像(1:2.18)へと発展し、テレビでも現行の標準システム(1:1.33)からハイビジョン(1:1.78)へと、横長大型化へと拡がりつつある。これも、観察者の視野の拡がりも横長であることと、眼や頭部を動かして情報を得ようとする動作が上方より水平と下方に多く発生することが関係している。ただ、その特性より、やや横長に拡がり過ぎているが、動きのあるスポーツ映像などが見やすくなっている。

これらの方式以外にも、空間に立体像を再現する体積型スクリーン(図6(d))が、継時表示方式での走査機構や固体発光素子⁹⁾を用いて試作されている。ただ、表示サイズや画質面がまだまだ不十分で、新しい発想による体積型スクリーンの開発が待たれるとともに、複合型表示方式として大きく発展する方式でもある。

4. おわりに

高度情報化社会になると、情報収集・表示システムと人間とがより密着化した状況下になり、利用者の能力に整合できる性能・機能を備えた製品の開発

が要求される。とくに、情報を利用する年齢層の拡がりに伴い、今までのように利用者側が機器に合わせる事が非常に難しくなる。機器ではなくて、利用者の癖に合った道具になるためにも、個人や作業環境に応じて性能調整できる適応型ディスプレイ・システムの開発が、同時に、機能低下をもたらした人達の有力な補助具（多機能老眼鏡など）にもなる可能性がある。

一方、より自然な三次元空間を再現する「高臨場感ディスプレイ」も、ナノ技術を駆使した極微細表示デバイス開発による超高精細ディスプレイの出現により、立体観察用装具なしで思わず触れてみたくなるようなディスプレイ・システムが意外と早く実現できるように思われる。高密度ディスプレイで再現できる情報空間は、現在の平面映像と比べて、観察者と表示情報との積極的な関係を自然に生み出す特徴もっている。その特徴を利用して、教育・訓練などでの情報利用効果が生み出せれば、本当の意

味での次世代ディスプレイとして定着することであろう。

文 献

- 1) 畑田豊彦：映像観視時の生体反応，1. 総説，テレビ誌 50: 419-422, 1996.
- 2) 大石 巖，畑田豊彦，田村 徹：ディスプレイの基礎，共立出版，東京，2001.
- 3) 山口雅浩：ナチュラルビジョン・システム，光技術コングレス 41: 139-147, 2003.
- 4) 森 峰生，畑田豊彦，石川和夫，寺島信義，大頭仁：臨界融合周波数以上の点滅刺激による明るさ知覚への影響，映像メディア学会誌 52: 612-615, 1998.
- 5) 研野孝吉，松浦重明他：高臨場感ディスプレイ，谷千束編，99, 10-32，共立出版，東京，2001.
- 6) Javidi B & Okano F Ed: Three-Dimensional Television, Video and Display Technologies, 462-487, Springer, Berlin, 2002.
- 7) 名手久貴：超多眼立体ディスプレイとその評価，Vision 15: 87-91, 2003.
- 8) Lewis JD, Verber CM & McGhee RB: A true three-dimensional display. IEEEtrans ED-18, 724-732, 1971.

ロービジョンの眼鏡矯正 (弱視レンズは含まず)

湖崎 克

大阪市 (湖崎眼科)

1. はじめに

ロービジョン者の行う近業か読書には、文字の拡大か、弱視レンズによる網膜像の拡大が最も標準的な視覚補助手段である。

しかし、ロービジョン者には強度の屈折異常を合併していることが多く、必ずしも拡大という手段によらずとも、その屈折異常を適切に矯正することで、それぞれの quality of life (以下 QOL) の向上を得られることが多いため、まず眼鏡矯正を試みるべきである。

2. 視覚障害児と視覚補助具

1) ロービジョンと教科書活字

ロービジョン児 (以下 ロ児) は当然のことながら、標準的な教科書活字を読むのには抵抗がある。そこで湖崎²⁾は、初号～6ポイントまでの11種の大きさの活字を小学校児童に、各学年別のそれぞれの教育漢字を提示し、それを読むに必要な近視視力を検討し

た。その成績は表1のごとくである。一般的な小学校国語教科書で用いられている4号活字では、1年では近視視力0.17でよいが、字画の多い6年では近視視力は0.29が必要である。また、最も一般で広く用いられる9ポイントでは、6年では近視視力は0.50が必要であると報告している。更に、視力0.1未満の低視力には、活字の拡大印刷にも限度があり、視力増強補助具 (弱視レンズ) が必要であるとしている (表1)。

2) 盲学校児童・生徒の使用文字

2000年度の盲学校視覚障害原因などの調査報告³⁾により、盲学校児童生徒の視力と使用文字の関係は図1のごとくである。全盲や極度の低視力では、当然普通文字で学習することは困難で、点字使用であるが、一方比較的視力が良ければ点字によらなくとも普通文字を読むことは可能となる。この点字学習か文字学習かの選択は、視覚などの要素も大きいですが、視力ではおよそ指数弁～0.01あたりが、その境界ということがわかる。この境界視力は1970～1980年度

表1 眼前30cmの教科書活字を読むに必要な視力

	活字の大きさ									
	初号	1号	2号	3号	4号	12ポ	5号	9ポ	6号	6ポ
1学年	0.08	0.09	0.12	0.13	0.17	0.20	0.23	0.27	0.37	0.50
2	0.09	0.10	0.12	0.16	0.20	0.20	0.26	0.36	0.46	0.60
3	0.09	0.10	0.12	0.16	0.21	0.24	0.38	0.38	0.46	0.60
4	0.08	0.10	0.14	0.19	0.25	0.28	0.34	0.42	0.50	0.62
5	0.09	0.12	0.16	0.21	0.29	0.35	0.40	0.47	0.51	0.63
6	0.09	0.12	0.16	0.21	0.29	0.34	0.38	0.50	0.54	0.72

湖崎による

別刷請求先: 530-0001 大阪市北区梅田3-1-1 アクティ大阪17階 湖崎眼科 湖崎 克
(2003年10月9日受理)

Reprint requests to: Masaru Kozaki Kozaki Eye Clinic
17F Acuity Osaka, 3-1-1 Umeda, Kita-ku, Osaka 530-0001, Japan
(Received and accepted October 9, 2003)

の報告では視力0.02~0.03あたりで、1985~1995年度の報告では視力0.01~0.02であり、この境界視力が低くなる傾向は普通文字による情報量が多いために文字指向が増えたことと、それに対応して視覚補助具がよくなったことが影響していると考えられる(図1)。

3) 盲学校児童・生徒の視覚補助具の使用状況

更に同報告で、視覚補助具使用状況の調査を行っており、表2のごとくである。内容は1995年度との比較を行っており、興味があるのは、従来弱視レンズが主体であったものが、近年拡大読書器が広く用いられるようになってきたことである。これは拡大率も高く、視野も広くて用いやすい上に、最近

助の関係で購入しやすくなったこともあろう。なお、併用者が増えているのは、多種類の視覚補助具を、課題に応じて使い分けられていることが推察される(表2)。

3. 障害児と屈折異常

1) 心身障害児の屈折矯正の目的

(1) 視覚障害児

眼器質変化に気をとられ、屈折異常を見逃していることが多い。そして屈折矯正により、ときには即座に矯正視力の向上することもあり、また矯正後の視的学習により、視力発達が期待されることもあるが、たとえ視力向上がなくとも、学習能力が向上することが期待できる症例もある。

(2) 精薄、肢体不自由児

心身の障害に気をとられ、屈折異常を見逃していることが多く、また検査が困難なことが放置されている原因ともなっている。しかし、屈折矯正により、矯正視力の出ることが多い。

2) 検診成績

筆者は大阪市立小児保健センター眼科において、下記の心身障害児の屈折集団検診を行い報告した(湖崎 克, 大畑垂穂:心身障害児の屈折矯正. 第115回大阪眼科集談会 1967.)。

(1) 視覚障害児

大阪市立、大阪府立および神戸市立の3盲学校児か

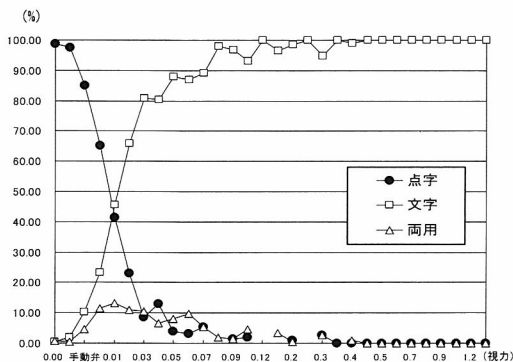


図1 盲学校児童生徒の視力と使用文字の関係

表2 視覚補助具の使用状況

視 覚 補 助 具	2000年度 使用者数 (%)		1995年度 使用者数 (%)	
弱視レンズ	588	(37.72)	762	(46.49)
近用のみ	343	(22.00)	280	(17.08)
遠用のみ	92	(5.90)	83	(5.06)
近用と遠用・遠近用	153	(9.81)	399	(24.34)
拡大読書器のみ	171	(10.97)	106	(6.47)
ワープロ・パソコンのみ	147	(9.43)	254	(15.50)
遮光レンズのみ	113	(7.25)	109	(6.65)
併 用	480	(30.79)	358	(21.84)
弱視レンズと拡大読書器	181	(11.61)	90	(5.49)
弱視レンズとワープロ・パソコン	39	(2.50)	74	(4.51)
弱視レンズと拡大読書器、ワープロ・パソコン	20	(1.28)	38	(2.32)
弱視レンズとその他併用	141	(9.04)	107	(6.53)
拡大読書器とワープロ・パソコン	16	(1.03)	15	(0.92)
拡大読書器とその他併用	47	(3.01)	17	(1.04)
ワープロ・パソコンとその他併用	24	(1.54)	17	(1.04)
その他併用	12	(0.77)	—	—
その他	34	(2.18)	15	(0.92)
不明	26	(1.67)	35	(2.14)
計	1,559	(100.00)	1,639	(100.00)

ら検査希望の130名を対象に検査を行い、レチノスコピー不可能96眼を除き、遠視21眼、遠視性乱視21眼、近視52眼、近視性乱視55眼、混合乱視4眼、正視11眼で、矯正可能が67名もみられ、結局眼鏡処方者は73名であった。

(2) 精薄児

大阪学芸大学（現 大阪教育大学）付属、高槻および八尾の3養護学校児の105名で、レチノスコピー不可能の6眼を除き、遠視28眼、遠視性乱視33眼、近視49眼、近視性乱視59眼、混合乱視12眼、正視23眼で、矯正可能が54名もみられ、眼鏡処方者が47名であった。

(3) 肢体不自由児

大阪府立養護学校の34名で、遠視8眼、遠視性乱視22眼、近視10眼、近視性乱視19眼、混合乱視6眼、正視3眼で、矯正可能が16名もみられ、眼鏡処方者も16名であった。

以上のごとく、心身障害児には屈折異常が多くみられ、眼鏡矯正の必要な者も非常に多いことが理解される。

4. ロービジョンの眼鏡矯正の手順

1) 使用目的の把握

まず問診により、何が見たいか、遠見（テレビ、黒板など）か近見（近業、読書、visual display terminal (VDI) 作業など）かを十分に把握する。

2) 視力検査

遠見、近見の片眼・両眼の矯正視力、最良読字力*（眼を近づけて読み得る最も細かい文字と距離を測定する）検査時に使用眼も決まる。

3) 屈折検査

調節麻痺下のレチノスコピー。

4) 矯正方法と矯正度の決め方

近見用の処方、最良読字力の距離に、調節を配慮して矯正度を決定する。なお、屈折異常の種別や眼疾患の内容にも配慮が必要である。

5. 症 例

1) 低視力無水晶体

症例1は表3のごとくである。矯正視力は右眼(0.06)、左眼(0.1)で左眼を用いている。近見には最良読字力は視認距離7~8cmでS+18Dを処方し、0.7の文字が読めている。

症例2は表4のごとくで、右眼のみ(0.08)の視力

で、近見は最良読字力は10cmの距離で、S+20Dを用いて(0.4)であり、眼鏡は右眼遠用S+12D、近用S+20Dのエグゼクティブ型の2重焦点（加入部は接着で）を用いさせたが、高学年になり文字が小さくなってくれば弱視レンズを用いることとした。

2) 水晶体偏位

症例3は表5のごとくで、6歳ころより強度近視

表3 症例1 低視力無水晶体矯正例(1)

症 例:	6歳9カ月, 男子	
病 歴:	3歳11カ月で両眼白内障 op. (某大学)	
視 力:	右眼 (0.06),	左眼 (0.1)
屈 折:	右 徹照不能	左 $\begin{array}{ c } \hline +6.5D \\ \hline \end{array}$
常用眼鏡:	右 +8.5D	左 +7.0D
近用処方:	右 0D	左 +18.0D
近見視力:	NLV= (0.06×S+18.0D)	30cm
	最良読字力= (0.7×S+18.0D)	7~8cm

表4 症例2 低視力無水晶体矯正例(2)

症 例:	6歳, 男子	
病 歴:	先天性白内障で2歳で op. 3歳で眼鏡, 今回就学	
視 力:	右眼 (0.08×S+12.0D),	左眼 SL
屈 折:	右 $\begin{array}{ c } \hline +11.5D \\ \hline \end{array}$	左 $\begin{array}{ c } \hline \text{不能} \\ \hline \end{array}$
最良読字力:	NRV= (0.4×S+20.0D)	
	最良読字距離 10cm	
処 方:	右 S+12.0D 近用 S+20.0D の	
	2重焦点レンズ (接着レンズ)	
今後の方針:	高学年になり文字が小さくなれば弱視レンズを試みる	

表5 症例3 水晶体偏位, 強度近視(3)

症 例:	12歳, 女子	
病 歴:	6歳より強度近視でメガネ	
視 力:	右眼 (0.1×S-15.0D),	左眼 (0.1×S-14.0D)
	所持メガネ -12.0D (両)	
屈 折:	麻痺下レチノスコピー	
	無水晶体部 右 $\begin{array}{ c } \hline +8.0D \\ \hline \end{array}$	左 $\begin{array}{ c } \hline +8.0D \\ \hline \end{array}$
	水晶体部 右 $\begin{array}{ c } \hline -18.0D \\ \hline \end{array}$	左 $\begin{array}{ c } \hline -17.5D \\ \hline \end{array}$
自然瞳孔下	右眼 (0.1×S-15.0D),	
	左眼 (0.1×S-15.0D)	
	右眼 (0.6×S+7.0D),	
	左眼 (0.5×S+7.5D)	

経過は、視軸が水晶体部 → 無水晶体部へ変わったか？

今後は、凸の遠近両用で

表6 症例4 白児眼

症 例：31歳，女性
 病 歴：6歳より小児保健センターへ
 当院へは1989年7月14日より
 病 名：白児眼，眼振，遠視性乱視
 視力屈折：①1993年までS+6.0D（両）調光レンズ
 右眼（0.1），左眼（0.09），BV=（0.1）
 最良読字力（0.4×JB）in 2cm
 ②1989年7月14日 麻痺下レチノスコピー
 最良読字力（0.5×JB）in 3cm
 LVA 近 Nikon 8× 遠 3×双眼鏡 $\begin{array}{|c|c|} \hline +5.0D & +5.0D \\ \hline \end{array}$
 処方 S+7.0D C-C-2.0D Ax160°（両）調光レンズ
 ③1993年9月1日 右眼（0.2），左眼（0.2）
 BV=（0.15）最良読字力（0.5×JB）in 5cm
 近用処方 S+15D C-C-2.0D Ax180°
 ④1999年 LVA：右LVA 12×8 左遮閉板
 NRV=（1.0×LVA 12×8）
 遠は右 S+8.0 C-C-3.0D Ax180° 近はそのまま
 左 S+7.0 D C-C-3.0 Ax180°
 ⑤2003年1月29日 最良読字力（0.6×NJB）in 3cm

の眼鏡を装着していた。そこで調節麻痺下のレチノスコピーでは，無水晶体部が両眼とも+8.0Dで，水晶体部が右眼-18.0D，左眼-17.5Dの強度近視であったので，再度自然瞳孔下の自覚検査では，+レンズが良い視力であり，この段階で視軸が無水晶体部を通っていることが明らかとなり，眼鏡は凸の遠近両用とした。水晶体偏位には，このような屈折変化をみることがあるので，常に水晶体部と無水晶体部の屈折をチェックする必要がある。山元ら³⁾および湖崎⁴⁾は，本症の屈折の推移について報告している。

3) 白児眼

症例4は表6のごとくである。1993年まではS+5.0Dの調光レンズで，最良読字力はその眼鏡で2cmで（0.4）であった。その間近見には弱視レンズはニコン8×，遠見には3×双眼鏡を使用していた。なお，通常の近見には調節が不足のため，近用処方を用いた。1999年より，Keeler LVA12×8を使用する。要するに年齢が上がると，最良読字力の視認距離に調節ができなくなるのである。

4) 強度遠視

症例5は表7のごとくである。最強度の遠視で屈折（異常）性弱視であったが，早期に屈折矯正を行うことで，10歳では（0.7）と（0.6）の視力に発達したが，なお近見視力が調節不良のためか（0.3）までであり，完全矯正コンタクトレンズの上に，2重焦

表7 症例5 強度遠視

症 例：5歳，男子
 現病歴：3歳ごろより，TVを見ている様子に気付き，
 5歳で強度遠視と診断
 視 力：右眼 0.1（0.2×S+10.0D），左眼 0.1（0.2×S+10.5D）
 屈 折：麻痺下レチノスコピー $\begin{array}{|c|c|} \hline +11.5D & +12.0D \\ \hline \end{array}$
 最初からの処方：S+5.0D→ S+8.0D→ S+11.0D
 10歳で，右眼（0.7×S+11.0D），
 左眼（0.6×S+11.0D）
 近視視力 NBV=（0.3×S+11.0D）学習抵抗
 処 方：完全矯正 CL +遠0 近 S+4.0DのEX二重焦点

表8 症例6 強度近視+網膜変性

症 例：9歳，女子
 現病歴：幼少期より，強度近視と処方され
 視 力：右眼 0.02（0.1×S-15.0D），
 左眼 0.03（0.1×S-16.0D）
 近見 NBV=（0.2×所持眼鏡） S-12.0D（両）
 屈 折：麻痺下レチノスコピー $\begin{array}{|c|c|} \hline -18.0D & -18.5D \\ \hline \end{array}$
 屈折矯正の考え方：0.1～0.2の近見視力で，0.5が必要の文字を
 読むため近見の視距離は1/3～1/4の距離
 で，10cmとして調節は10Dが必要となる
 近見の処方：S-7.0D（両）で，視認距離8cmで，0.5～0.6
 の文字が読める
 今 後：遠用は遠用LVAか，近S-7.0DのCLに，遠用の
 追加メガネか

点眼鏡を処方した。

5) 強度近視+網膜変性

症例6は表8のごとくで，矯正視力は（0.1～0.2）である。近見には最良読字力で0.5～0.6を得るための視認距離は10cmとして調節が10Dが必要となるので，年齢に応じて完全矯正より近視度を引かなければならない。

6. おわりに

ロービジョン者には強度の屈折異常を合併していることが多く，眼鏡矯正のみでQOLの向上が期待できる症例も少なくないので，まず眼鏡矯正を試みるべきである。

脚 注

※この考え方は，眼科的な検査というよりは，非常に現場での実際的なもので，日本弱視教育研究会では以前より「最

大視認力」という用語が用いられてきた。しかし、視覚生理、眼光学の用語としては誤解が多く、今回の眼光学学会において、所 敬、加藤桂一郎両教授からのご指導から「最良読字力」とした。

文 献

1) 湖崎 克：弱視児の教育的措置に関する研究，その1，

教科書活字について．日眼会誌 65: 1990-1995, 1961.

2) 筑波大学心身障害学系 香川邦夫：全国盲学校および小・中学弱視学級児童生徒の視覚 障害原因等に関する調査研究（2000年）

3) 山元由利恵，辻岐代子他：小児の水晶体偏位症例の視力予後．臨眼 43: 610-611, 1989.

4) 湖崎 克：種々の病態を示した水晶体偏位の一家系．Practical Ophthalmology 57: 116-117, 2000.

病的近視の眼鏡矯正

所 敬

東京医科歯科大学

Spectacle Prescription in Pathologic Myopia

Takashi Tokoro

Tokyo Medical and Dental University

1. はじめに

近視の分類には弱度近視，強度近視；屈折性近視，軸性近視；先天近視，後天近視；単純近視，病的近視などがある。また，病的近視は変性近視，悪性近視などと称されていることもある。病的近視の診断基準は厚生省特定疾患網膜脈絡膜疾患調査研究班によると，5歳以下では -4.00 D をこえ，矯正視力が0.4以下，6～8歳では -6.00 D をこえ，矯正視力は0.6以下，9歳以上では -8.00 D をこえ，矯正視力は0.6以下になっている¹⁾。病的近視の裸眼視力も矯正視力も屈折度とともに直線的に低下する。そして， 15 D をこえたと矯正視力1.0以上のものはみられない²⁾。

ここでは， -8.00 D をこえる病的近視者が常用している眼鏡度数の調査結果と病的近視者への眼鏡処方方の注意点を述べる。

2. 病的近視者の眼鏡装用状況

調査した対象は男女136名で，常用眼鏡を装用した状態で視力の良い方の眼のみを採用した。年齢は11～78歳で（40歳未満：65名65眼；40歳以上：71名71眼），男性68名68眼，女性68名68眼であった。屈折度は他覚的屈折度を参考に自覚的屈折検査を行い，その眼の屈折度と矯正視力を求めた。また，常用眼鏡度数はレンズメータで測定した。

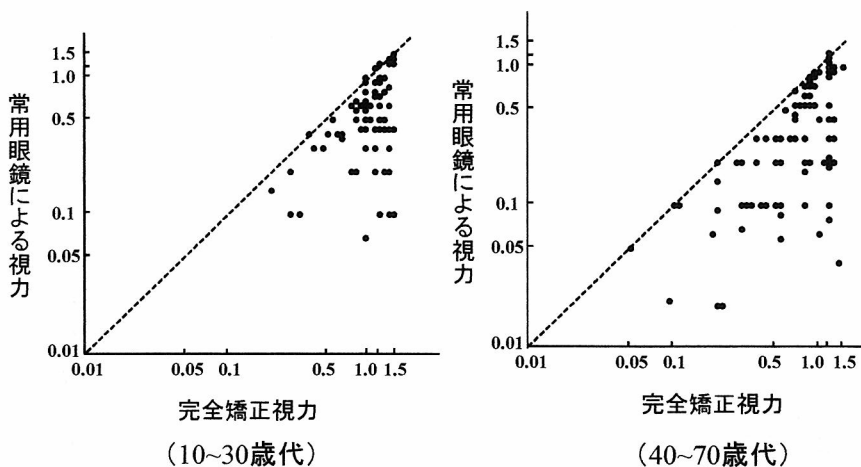


図1 完全矯正視力と常用眼鏡による視力との関係

別刷請求先：221-0852 横浜市神奈川区三ツ沢13-24 所 敬
(2003年10月28日受理)

Reprint requests to: Takashi Tokoro
13-24 Mitsusawa-Shimo-cho, Kanagawa-ku, Yokohama 221-0852, Japan
(Received and accepted October 28, 2003)

1) 完全矯正視力と常用眼鏡による視力との関係

若年者層と高齢者層ともに常用眼鏡視力は完全矯正視力より低い視力の眼鏡を常用していた(図1)。とくに、高齢者層でこの傾向は強くみられた。これは、老視の影響もあると思われる。しかし、若年者層でも矯正視力が良好であるにもかかわらず、視力の十分に矯正されていない眼鏡を装着しているものが多くみられた。

2) 常用眼鏡の低矯正の程度

若年者層と高齢者層でどの程度の低矯正眼鏡を装着しているかを調べた結果が図2である。両者ともに常用眼鏡の低矯正の程度と屈折度とは有意の相関関係($p < 0.001$)があり、屈折度が強いほど、すなわち近視が強いほど、低矯正の程度が強くなりみられた。

とくに、高齢者では低矯正のものが多く認められた。なお、常用眼鏡の低矯正の程度を男女に分けて検討したが、男女差はほとんどなかった(図3)。以上の結果から、近視の程度と常用眼鏡の低矯正の程度との関係は、 $-10D$ 程度の近視では $1\sim 2D$ 、 $-15D$ 程度では $3\sim 4D$ 、 $-20D$ 程度で $5\sim 6D$ 低矯正になっていることが多かった。

3. 病的近視の眼鏡矯正

1) 近見視力重視の眼鏡処方

現在の社会ではコンピュータをはじめ、近見作業が重要である。近見視力は 30 cm の近距離視力表で測定するが、低視力の病的近視者は更に眼を書物に近づけて見ている。すなわち、 30 cm での近距離視力が

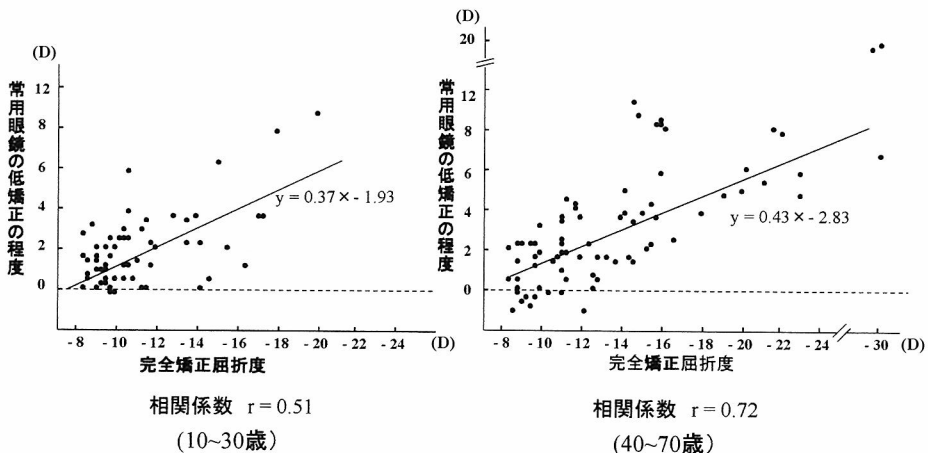


図2 常用眼鏡の低矯正の頻度(年齢別)

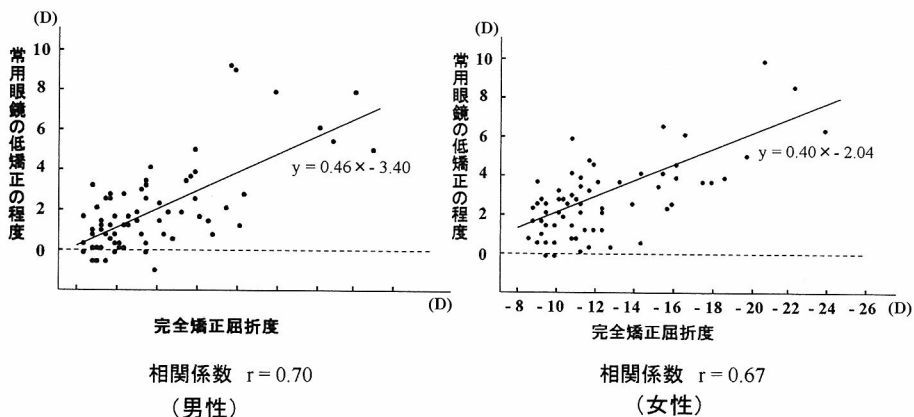


図3 常用眼鏡の低矯正の頻度(男女別)

0.1であっても、15 cm に近づけば 30 cm 近距離視力表の 0.2 まで読めるようになる。更に、10 cm では 0.33、5 cm では 0.6 まで読めて、新聞を読むことができるようになる（新聞は 0.4~0.5 の視力で判読可能である）。30 cm 近距離視力表を X cm まで近づいたときどの大きさの視標まで読めるかは、30 cm 近距離視力 $\times \frac{30}{X}$ であらわせる。例えば、30 cm 近距離視力 0.2 の人が 10 cm まで近づけば $0.2 \times \frac{30}{10} = 0.6$ の視標まで読める計算になる。近視の程度が強いほど、遠点が近く矯正視力が悪いので、その人の調節力などを考慮して近見重視で眼鏡を処方するようにするとよい。

2) 眼鏡レンズによる矯正効果³⁾

眼の屈折度は眼鏡レンズの度数であらわす。しかし、眼の実際の屈折度はこの値と異なる。実際の眼の屈折度は眼の主点屈折力であるが、ここでは、眼の角膜頂点屈折力で考える。眼の角膜頂点屈折力 [A (D)] ; レンズの後頂点屈折力 [L (D)] ; 頂点間距離 [k (m)] とすれば、 $A = \frac{L}{1 - kL}$ になる。通常、頂点間距離は 12 mm = 0.012 m であるから、眼鏡レンズが -10 D の場合には眼の角膜頂点屈折力は -8.93 D になる。頂点間距離が 30 mm = 0.03 m のときには -7.69 D になり、処方眼鏡をずらして装用すると低矯正になり、近方が見やすくなる。また、低矯正眼鏡を眼に近づけて装用すると遠方が比較の見やすくなる。処方低矯正にして、必要に応じて眼鏡を近づけたり、遠ざけたりする方法もある。

3) 眼鏡レンズによる見掛けの調節力³⁾

眼鏡レンズは眼から離して装用するので、見掛けの調節力が関与する。眼鏡レンズによる見掛けの調節力 [B (D)]、その眼の調節 [A (D)]、頂点間距離 [k (m)]、眼鏡レンズ度 [L (D)] とすれば、 $B = \frac{A}{1 + 2kL} - A$ になる。例えば、-5.00 D の近視眼の眼前 12 mm

(0.012 m) に -5.00 D のレンズを装用させ、25 cm にある物体を見せたとき (4.00 D の調節) の見掛けの調節力は 0.50 D になる。+5.00 D の遠視眼では -0.50 D になる。すなわち、近視では見掛けの調節力によって、眼鏡装用時でも近くが楽に見える。そこで、40 歳くらいの完全矯正眼鏡を装用している近視の人にコンタクトレンズを処方すると見掛けの調節がなくなり、近くが見にくいと訴える。眼鏡レンズ度と調節による眼鏡レンズの見掛けの調節力との関係は図 4 のごとくである。

4) 病的近視と Knapp の法則³⁾

屈折異常の原因が眼軸延長の場合に眼の前焦点 (眼前 15.7 mm) に眼鏡レンズを装用したときには網膜像は縮小せずに変わりがないというのが Knapp の法則である (図 5)。病的近視は軸性の近視なので、強度近視性不同視の場合に眼鏡レンズを眼の前焦点に置けば不等像視が起こらないことになる。そこで、この点を考慮して処方を考えてもよい。しかし、屈折異常の原因がすべて軸性とは限らず屈折性の部分もあるので、単純ではない。また、軸性近視では視細胞間隔が広がっていることも考慮する必要がある⁴⁾。

5) 芯取り点間距離³⁾

眼鏡レンズ処方上の瞳孔距離は正確には芯取り点間距離である。すなわち、眼鏡レンズを眼鏡枠に入れたときの左右レンズ光心間距離のことである。

凹レンズは中心部が薄く周辺部が厚いレンズで、周辺に基底を向けたプリズムの集まりと考えることができる。眼鏡処方では調節力の十分ある若年者では瞳孔距離から 2 mm 引いて処方することが多い。しかし、病的近視例では完全矯正ではなく弱めに処方することが多いので、近方を見るときに既定の調節をしない。そこで、それに伴う輻湊も十分にしないことを考えると、瞳孔距離から 2 mm 引かないで処方するときの方が輻湊が楽になる。また、通常、近用専

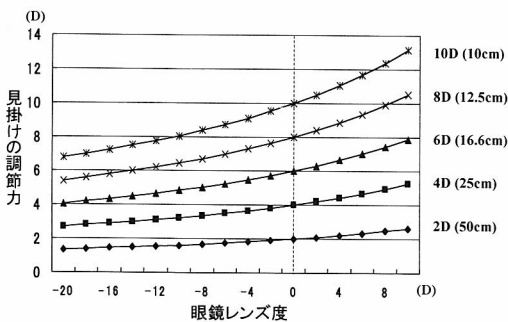


図 4 眼鏡レンズによる見掛けの調節力

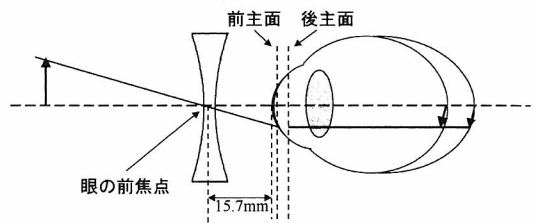


図 5 Knapp の法則

表1 眼鏡レンズの材質

	屈折率	アッベ数	比重
クラウンガラス	1.523	58.5	2.54
CR-39	1.498	58.7	1.32
高屈折率レンズ			
ガラス	1.835	31.5	3.59
プラスチック	1.67	32	1.35

用眼鏡の処方では瞳孔距離から4~5mm引くが、病的近視での近用専用眼鏡で芯取り点間距離を瞳孔距離から引くとしても少なめに引く方がよい。

6) 眼鏡の重量

(1) 眼鏡レンズ

病的近視ではレンズが厚くなり重量が増す。ガラスレンズは眼鏡クラウンレンズ(屈折率1.523, アッベ数58.5, 比重2.54)に代表される。最近, 眼鏡レンズの軽量化のために高屈折率ガラスレンズ(屈折率1.830, アッベ数32.0, 比重3.59)が発売されている。-3~5 D以上の屈折度ではクラウンガラスに比べて軽量になる。

プラスチックレンズは軽量化の点でガラスレンズに優る。近年はプラスチック化が進み, プラスチックレンズが市場の約80%を占めるようになった。プラスチックはガラスに比べて, 比重は軽い, 屈折率も低いので, 当然レンズは厚くなる。一般的なプラスチックレンズはCR-39(Columbia Resin No. 39)(屈折率1.498, アッベ数58.7, 比重1.32)が用いられている。屈折率が1.55~1.58を中屈折率レンズ, 1.6~1.71を高屈折率レンズと呼んでいる。ガラスほど著明でないが, 高屈折率素材では比重が高くなる。しかし, 屈折度が ± 4.0 D以上のレンズでは軽量化する。現在の高屈折率レンズは表1のごとくである。高屈折率素材ではアッベ数が小さくなり, 光の分散のためレンズの周辺部を通して見ると色収差が目立つ。現在の高屈折率レンズのアッベ数は色収差の上からほぼ限界と考えられている。

(2) 眼鏡フレーム

高屈折率レンズを使っても病的近視の眼鏡の重量は増加することが多いので, 眼鏡フレームは軽いも

のがよい。眼鏡の重量の約90%は鼻根部に, 約10%が耳介にかかっている。最近は眼鏡フレームの小型化の風潮があり, これによって, 眼鏡全体の重量は軽くなる。

7) Fuchs 斑に対するプリズム処方

両眼 Fuchs 斑あるいは片眼が失明して他眼に Fuchs 斑があるときには偏心固視していることがある。このときには偏心固視している部位に結像するようにプリズムを処方することもある⁹⁾が, 患者の意欲も必要であり, なかなか難しい。

4. 病的近視の眼鏡矯正の考慮点

病的近視の眼鏡矯正の考慮点をまとめると以下のごとくになる。

- 1) 低矯正に処方する
- 2) 中近視力に留意する
- 3) 見掛けの調節力に考慮する
- 4) 芯取り点間距離を通常より広くする
- 5) 高屈折率プラスチックレンズを処方する
- 6) 小型の眼鏡枠が望ましい
- 7) Fuchs 斑に対してはプリズム処方を試みる

執筆にあたり, 病的近視者の眼鏡装用状態の調査にご協力下さった東京医科歯科大学眼科強度近視専門外来グループの大野京子, 二神 創, 吉田武史, 安澄健次郎, 島田典明, 小島有里子の諸先生に感謝いたします。

文 献

- 1) 所 敬, 丸尾敏夫, 金井 淳, 林 一彦: 病的近視診断の手引き. 厚生省特定疾患網膜脈絡膜萎縮症調査研究班(班長, 中島 章)1987.
- 2) 所 敬, 林一彦, 佐藤公子, 打田昭子, 伊藤百合子: 強度近視の視機能障害とその病態に関する研究. 日眼会誌 81: 330-339, 1977.
- 3) 所 敬: 屈折異常とその矯正. 第3版, 175, 190, 199-200, 224-225, 金原出版, 東京, 1997.
- 4) 所 敬, 佐藤百合子, 山下牧子, 岡嶋弘和, 長谷川弘: 軸性近視矯正による網膜像と不等像視. 日本眼科学学会誌 1: 13-17, 1979.
- 5) Romayananda N, Wong SW, Elzeiney IH & Chan GH: Prismatic scanning method for improving visual acuity in patients with low vision. Ophthalmology 89: 937-945, 1982.

原 著

液晶ディスプレイ用フィルター使用による疲労緩和効果

川守田拓志¹⁾, 半田知也²⁾, 魚里 博^{1,2,3)}

¹⁾北里大学大学院医療系研究科視覚情報科学

²⁾北里大学大学院医療系研究科眼科学

³⁾北里大学大学院医療系研究科視覚情報科学, 北里大学大学院医療系研究科眼科学, 北里大学医療衛生学部リハビリテーション学科視覚機能療法学教室

Relaxation Effect on Eye Fatigue with the Use of Filter for Liquid Crystal Displays

Takushi Kawamorita¹⁾, Tomoya Handa²⁾, Hiroshi Uozato^{1,2,3)}

¹⁾Department of Visual Science, Master's Program of Medical Science, Kitasato University Graduate School

²⁾Department of Ophthalmology, Doctor's Program of Medical Science, Kitasato University Graduate School

³⁾Departments of Orthoptics and Visual Science, Faculty of Rehabilitation, School of Allied Health Science, Kitasato University

コンピュータ液晶ディスプレイでの視作業による眼精疲労と、OA フィルター（東レ製）使用による眼精疲労の緩和効果を比較検討する。検討した項目は、限界フリッカー値（Critical Fusion Frequency, CFF）・屈折度・角膜曲率半径・近見反応・調節近点距離・動体視力・アンケートである。視作業後において、OA フィルター非使用時の CFF 値が OA フィルター使用時に比べ有意に低下した。近見反応の結果は、とくに瞳孔が関与している可能性が示唆された。また、アンケート結果より画面の見やすさが改善され、目・肩・首等の疲労が緩和される傾向がみられた。OA フィルターの使用で CFF 値の低下を抑えられたこと、また自覚的な疲労緩和もみられたことから、OA フィルターは、コンピュータ作業の疲労緩和に有用である。

(視覚の科学 24: 85-89, 2003)

キーワード：液晶ディスプレイ (LCD), LCD 用フィルター, 視作業, 眼精疲労, CFF

We investigated the eye fatigue caused by visual task on LCD (Liquid Crystal Display) and the relaxation effect on eye fatigue using a filter for LCD. Characteristics to be inspected were CFF (Critical Fusion Frequency), refractivity, corneal curvature, near reflex, near point of accommodation, kinetic visual acuity and questionnaire. The CFF value after using the filter was significantly lower than that without ($p < 0.05$). Moreover there is a possibility that eye fatigue is concerned with pupillary reaction in near reflex. Also, as a result of questionnaire, the quality of screen increased, and demonstrated a tendency to lessen eye fatigue. The results of the present study suggest that the filter for LCD help in alleviation of eye fatigue. (Jpn J Vis Sci 24: 85-89, 2003)

Key Words: Liquid crystal display (LCD), Filter for LCD, Visual task, Eye fatigue, Critical fusion frequency (CFF)

別刷請求先：228-8555 相模原市北里1-15-1 北里大学大学院医療系研究科視覚情報科学 魚里 博
(2003年10月20日受理)

Reprint requests to: Hiroshi Uozato, PhD, Dept of Orthoptics & Visual Science, Faculty of Rehabilitation, School of Allied Health Science, Kitasato Univ
1-15-1 Kitasato, Sagamihara 228-8555, Japan
(Received and accepted October 20, 2003)

1. 緒 言

現在、パーソナルコンピュータ（以下 PC）の表示画面は、薄型、軽量化、デザイン性、低消費電力、低価格化の実現などを背景に、液晶ディスプレイ（Liquid Crystal Display, 以下 LCD）が主流になりつつある。この LCD の急速な普及に伴い、眼精疲労を緩和するために LCD 用 OA（Office Automation）フィルターの需要も増加している。LCD 用 OA フィルターは、反射率を低下させることで映り込みや反射グレアの減少効果、また輝度・コントラストの適度な調整効果があり、LCD の見やすさに影響を与える要因は改善される¹⁾。しかし、視機能への有用性に関しては、視認性の向上、近視化の軽減効果²⁾等の報告はあるが、眼精疲労の緩和効果という観点から更に検討する必要がある。

そこで今回我々は、LCD 用 OA フィルター（東レ製）を使用し、PC アプリケーションの簡易ゲーム（以下 視作業）を30分間行わせ、限界フリッカー値、（Critical Fusion Frequency, 以下 CFF）・屈折度・角膜曲率半径・近見反応・調節近点距離・動体視力・アンケートの結果をもとに、視作業前基礎値・OA フィルター使用時・OA フィルター非使用時の3群（以下 基礎値・フィルター有・フィルター無）で比較した。

2. 方 法

1) 被験者

被験者は、屈折異常以外の眼科的疾患を有しない矯正視力（1.2）以上、両眼視、色覚、調節の正常な男性5名、女性4名（平均年齢20.8歳）で行った。

2) 視作業

視作業は、PC アプリケーションの簡易ゲームであるソリティアを用いた。この簡易ゲームを使用した理由は、作業の集中度を重要視したこと、また、マウスのみで簡単に操作できるため、ディスプレイ中心付近のみを注視でき、眼球運動による疲労を除外できることを優先したためである。なお、簡易ゲームの習熟度に差がないよう被験者は、事前に練習を十分行った。

本実験は、基礎値を測定した20分後に、1回目視作業30分、検査時間15分、休憩20分、2回目視作業30分、検査時間15分、の時間編成で行った。視作業は、フィルター有・フィルター無をランダムな順序

で実施した。

3) 作業装置・作業環境

実験に使用した LCD 用 OA フィルターは、E フィルター EZ2（東レ製）で、両面反射防止加工がされており、反射率0.2%、可視光線透過率70%である。LCD は、15インチモニターの1503FP（Dell 製）を用い、陽画表示にて使用した。視距離は約45cm、室内照度は約480lxであった。また、OA フィルターの使用により白色部輝度は133cd/m²から92cd/m²まで減少した。

4) 検査項目・検査方法

(1) CFF 値

HANDYFLICKER HF（NEITZ 製）を使用し、赤色（660nm）と緑色（555nm）、黄色（570nm）の視標を、両眼固視でそれぞれ3回消失法にて測定し、その平均値を各々の CFF 値とした。なお CFF 値は、時間経過や姿勢変化などによる変動が大きい³⁾ことから、装置を LCD の真横に設置し、視作業終了直後に視作業の視距離と同じ45cmで、暗順応を行わず暗室にて測定した。

(2) 屈折度・角膜曲率半径

オートレフラクトメータ WR-5100K（グランド精工製）を使用した。本装置の特徴は、日常空間に近い環境で測定できる両眼開放式のため、器械近視の影響を受けにくいことである。対象は、検査測定値の精度を保てるように、被験者のうちコンタクトレンズを装着していない14眼とした。屈折度は、等価球面値に換算し、評価を行った。

(3) 近見反応・調節近点距離

近見反応測定装置（浜松ホトニクス製）を使用した⁴⁾。本装置は、ダコモ近点計に電子瞳孔計イリスコーダが組み込まれており、調節近点距離から設定した移動幅で動く視標を追視させ、このとき生じた近見反応から両眼開放状態の瞳孔水平径、瞳孔面積、水平移動量を同時計測できる改良型の近見反応測定装置である。視標の移動幅は4D、往復回数は3回とした。今回採用したデータは、上眼瞼や睫毛の影響を受けておらず、安定した波形であった8眼の瞳孔水平径と輻湊量・開散量に相当する水平移動量である。また、この瞳孔水平径のデータから、平均縮瞳率、平均散瞳率を算出した。なお、輻湊による見かけの瞳孔水平径の変化は cos 関数で補正した⁵⁾。

(4) 動体視力

動体視力計 AS-4D（興和製）を使用し、前後に動

く物を認識する視力 (Kinetic Visual Acuity, KVA) を測定した。視標速度は 30 km/h で行い、両眼固視で 5 回測定し、幾何平均したものを動体視力値とした。

(5) アンケート

実験終了後に回答してもらい、OA フィルター使用前後で、「目・肩・首の疲れ」、「見やすさ」、「コントラスト」、「光の強さ」、の変化について「改善された・変化なし・悪化した」の 3 段階で評価した。

5) 統計解析

反復測定一元配置分散分析 (repeated measure one way ANOVA) を行い、有意差の得られたものに対し多重比較 (Fisher's PLSD) を用いた。有意水準は 5%未満とした。

3. 結 果

各検討項目における 3 群の結果を表 1 に示す。

1) CFF 値

全色調において、フィルター無が、基礎値に比べ有意な低下が認められた ($p < 0.05$)。一方、フィルター有は、基礎値に比べ有意な低下が認められなかった。また、フィルター無は、フィルター有に比

べ有意な低値を示した ($p < 0.05$) (図 1, 2)。

2) 屈折度・角膜曲率半径

屈折度の等価球面值, 角膜曲率半径においては有意な変化は認められなかった。

3) 近見反応・調節近点距離

近見反応においては、いずれも有意差は認められ

表 1 視作業前・後 (フィルター有・無) における視機能評価

	基礎値	フィルター無	フィルター有
CFF (Hz)			
赤色	35.59 ± 2.70	34.07 ± 2.65	35.33 ± 2.60
緑色	38.96 ± 1.57	37.67 ± 2.28	38.70 ± 2.14
黄色	39.22 ± 1.30	37.78 ± 2.17	39.22 ± 2.33
等価球面值 (D)	-2.03 ± 2.86	-2.17 ± 2.90	-2.13 ± 3.00
角膜曲率半径 (mm)			
弱主経線	7.89 ± 0.14	7.90 ± 0.13	7.85 ± 0.12
強主経線	7.74 ± 0.19	7.75 ± 0.17	7.70 ± 0.13
近見反応			
縮瞳率 (%)	17.35 ± 9.47	24.21 ± 17.66	19.84 ± 7.45
散瞳率 (%)	24.76 ± 13.42	30.25 ± 21.83	19.89 ± 12.01
輻輳量 (mm)	1.17 ± 0.33	1.06 ± 0.21	0.92 ± 0.23
開散量 (mm)	1.14 ± 0.34	0.93 ± 0.24	0.90 ± 0.28
調節近点距離 (cm)	10.56 ± 2.98	10.99 ± 3.08	10.78 ± 3.11
動体視力	0.75 ± 0.30	0.60 ± 0.30	0.61 ± 0.30

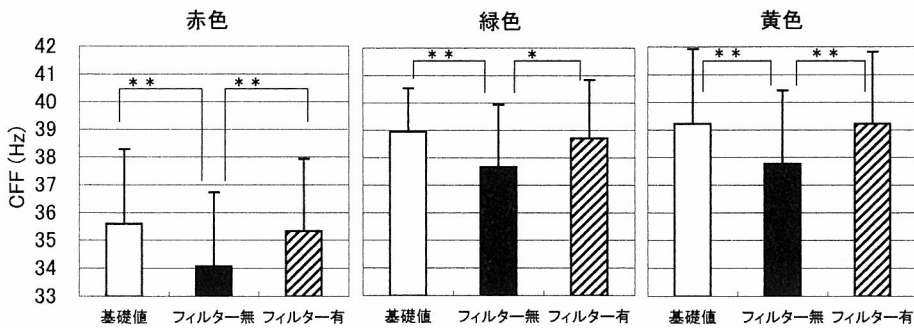


図 1 視作業前・後 (フィルター有・無) における CFF 値

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$

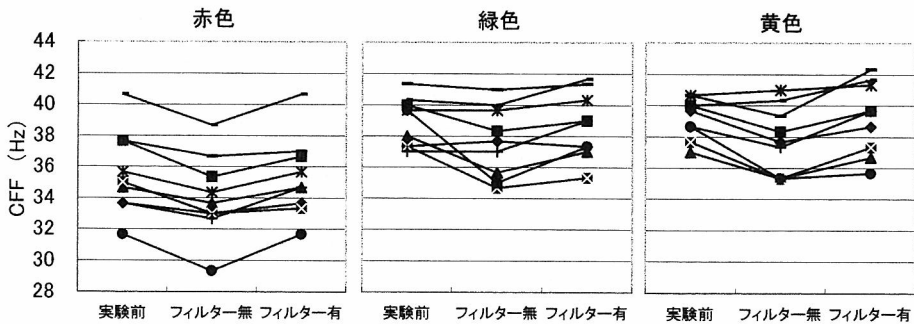


図 2 視作業前・後 (フィルター有・無) における CFF 値全例

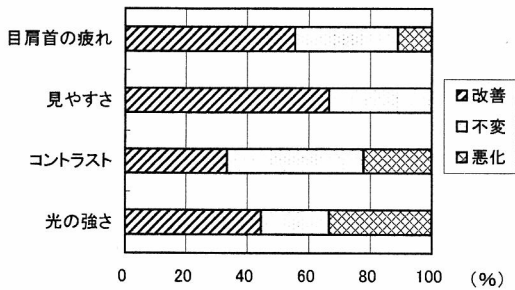


図3 OAフィルター使用有無における主観評価

なかったが、フィルター無が基礎値・フィルター有と比べ縮瞳率・散瞳率ともに大きい傾向であった。調節近点距離においては、有意な変化はみられなかった。

4) 動体視力

基礎値からフィルター無、フィルター有の両者とも有意に低下した ($p < 0.05$)。また、フィルターの有無での有意差は認められなかった。

5) アンケート

OAフィルターの使用により、「目・肩・首の疲れ」、「見やすさ」が改善された被験者はそれぞれ66.7%、56.6%であった。また、「光の強さ」が悪化したと回答した被験者は33.3%であった(図3)。

4. 考 按

今回我々は、視作業後に生じる眼精疲労とLCD用OAフィルター(東レ製)の使用による疲労の緩和効果について比較検討した。OAフィルターの使用により、CFF値の低下を軽減させる効果が認められた。また、視作業後の眼精疲労に瞳孔反応の関与が示唆され、アンケート結果はフィルターの有用性を示すものであった。

一般にCFF値は、眼科臨床において網膜・視路疾患等で低下することが知られているが、従来からその値の意味付けに議論がされており、精神医学・産業医学等の分野では精神疲労性の変化、大脳の活動水準をあらわす尺度としても認められている⁹⁾。今回得られたフィルター無におけるCFF値の低下は、変化量としては小さいため、どこまで臨床的意義があるかは不明である。しかしながら、CFFの測定には、測定値のばらつきを最小限に抑えるよう測定条件に配慮したこと、大多数の被験者にこの傾向がみられ、一色ではなく全色調で有意な低下がみられたこと、

また、CFF値と精神疲労性変化の報告⁹⁾から、上述した中枢性の影響と考えられる。したがって、フィルター無が、フィルター有に比べ有意な低値を示した結果は、30分程度の視作業で疲労の傾向があらわれるということ、またOAフィルターの使用により、疲労が緩和されることを示している。

屈折度の等価球面值と角膜曲率半径については、有意差は認められなかったが、OAフィルターの使用により視作業後の近視化が有意に軽減されたという報告もある²⁾。今回の実験では、OAフィルターの使用により、近視化が軽減された被験者は若干名存在したものの、有意な影響がみられなかった原因として、被験者の屈折度分布が多少広がったことが考えられた。

近見反応においては、いずれも有意差はみられなかったが、フィルター無で縮瞳率、散瞳率が増加する傾向が認められた。これらの結果から、フィルター無の視作業後、調節系の働きが鈍り、調節命令だけが過剰に送られることによって一時的に瞳孔反応が亢進していると考えられる。ただし、近見反応として同時に起こるはずの輻湊・開散に関して機能亢進はみられず、今後さらなる検討が必要である。

動体視力については、視作業後で有意な低下が認められたが、フィルター使用の有無では有意差は認められなかった。動体視力は、屈折と調節、疲労の影響を受けやすいとの報告⁷⁾があり、視作業後の有意な低下はこれらに起因するものと考えられた。

またアンケート結果より、半数以上の被験者は、フィルターの使用によって漠然とではあるが「目・肩・首の疲れ」や「見やすさ」の改善を感じており、CFF値等の検討結果とも矛盾しないものとなった。ただし「光の強さ」に関しては、「悪化した」と回答した被験者が比較的多く、ディスプレイ表示輝度の実験設定が低すぎた可能性がある。

以上、コンピュータ作業において、OAフィルターの使用が、眼精疲労の緩和に有用である可能性が示された。OAフィルターは、外光反射を低減させ⁸⁾、反射グレアや映り込みを抑えることと、輝度・コントラストの適度な調整をするという見やすさの向上を主機能としている。この見やすさという漠然とした感覚は、反射グレアや分光分布、輝度・コントラスト等、様々な要因が複雑に絡み合って生じていると考えられるが、これらが視機能に影響を与え、眼精疲労と大きくかかわっている可能性は高い。過

去の報告^{2, 9)}では、OA フィルターの使用による反射グレアの低減が、視認性の面と視覚疲労の面でとくに効果的な作用をしている、とされている。本実験で得られた結果は、このような見やすさを向上させる OA フィルターの機能により、反射グレアも含めた視作業環境が改善され、中枢系や調節系が影響を受けることで得られたものと考えられる。今後、更に眼精疲労を誘発しやすい要因を検討し、また視機能にどの程度影響が出ているのか詳細に調査する必要がある。

現在、LCD で視作業を長時間行う PC ユーザーにとって、眼精疲労緩和につながる視作業環境の改善は重要な課題である。本検討により、OA フィルターの使用で、視作業環境の改善による視機能低下の抑制効果が示唆されたことから、眼精疲労緩和の一助として、OA フィルターは有用だと考える。

文 献

- 1) 吉武良治, 土屋和夫: STN 液晶ディスプレイの見やすさに影響を与える要因の検討. 人間工学 29: 209-214, 1993.
- 2) 高橋 誠: 液晶ディスプレイの反射グレア低減による視覚疲労軽減効果. 労働科学 75: 373-381, 1999.
- 3) 橋本邦衛: Flicker 値の生理学的意味と測定上の諸問題. 産業医学 5: 3-18, 1963.
- 4) 鈴木武敏, 石川 哲, 魚里 博, 平岡満里, 梶田雅義, 中川皓夫, 袴田直俊: 輻輳検査もできる両眼開放イリスコーダの紹介. 眼臨 4: 456, 2002.
- 5) Uozato H & Guyton DL: Centering corneal surgical procedures. Am J Ophthalmol 103: 264-275, 1987.
- 6) Simonson E & Brozek J: Measurements of flicker fusion frequency as a test for fatigue of the central nervous system. Journal of Industrial Hygiene and Toxicology 23: 83-89, 1941.
- 7) 鈴木昭弘: 動体視力の研究. 日眼会誌 65: 368-381, 1961.
- 8) 高橋 誠: VDT 作業場の光環境の実態. 産業医学 33: 821, 1991.
- 9) 鈴木昭弘, 渥美一成, 水谷 聡, 辻中博子: VDT 使用による視機能への影響とその対策. 日本眼光学学会誌 5: 28-34, 1984.

Photorefractor と Crossed Cylinder Aberroscope の開発

II. Photorefraction に関する,

Brad Howland, Jan Atkinson および Oliver Braddick との共同研究

Howard C. Howland (Cornell University)

(訳 伊那真生子, 三橋俊文 (Topcon 研究所), 不二門 尚 (大阪大学))

1960年, 私の兄 Brad Howland と私は, ロングアイランドの海岸で, 後にフォトレフラクトメータとなる通信用装置を開発していた。当時私はニューヨーク州立大学ロングアイランドセンターという小さな教養学部の講師をしていた。その大学は後に SUNY ストニーブルック校と名を変え, New York 州のなかでも旗艦校となる学校となった。1960~1966年にかけて, Oyster Bay にて生物学入門を教え, SUNY から離れるとドイツ, Seewiesen にある Max Planck Institut Verhaltensphysiologie で研究を行っていた。この研究は, 私がタフツ大学にて, 高名な昆虫生理学者の Kenneth Roeder 氏のもとで修士論文を書いていたころに知り合った, Dr. Horst Mittelstaedt との友情により実現したのもだった。

そのうち, マサチューセッツ工科大学 (MIT) の 20号館にあるブラッドリーの研究所にある単体のパン切り台モデルにすぎなかった我々の直交フォトレフラクトメータの存在が知られるようになってきた。しかし, 1970年代初頭, 光ファイバーのライトガイド

が市場に登場してきた。ブラッドフォードは, これを円柱レンズの中心に配置することで, カメラのフォトレフラクトメータのアタッチメントとして使用できることに気が付いた (図1)。

我々がフォトレフラクトメータを使用し, その原理を論文に書き上げるまでには, 私のロングアイランドのニューヨーク州立大学からニューヨーク州イサカのコーネル大学への移動もあり, しばらく時間がかった。

1967年, 私は学生時代の友人の William T. Keeton から, コーネルに来て博士論文を書かないかと誘われた。彼はコーネル大学で何年にもわたって入門生物学を教えていたよく知られた教授で, 後にとても成功した革新的なテキストを書き上げたばかりだった。私はそのとき, SUNY のストニーブルック校で講師になり, 初等生物学を受け持っていた。Norton Press の Bill の編集者が彼の本を売り込みに来たのがきっかけで, その編集者を通じて Bill を再度紹介してもらうことができた。Bill にはストニーブルックまで来てもらい, 「ハトの帰巢」という彼の新しい研究について素晴らしい講義をしてもらった。その際

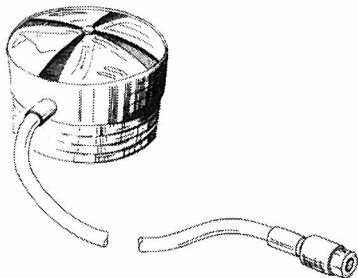


図1 直交フォトレフラクトメータの付属品
強主経線が同心円状に配置された4個の1.5Dの円柱レンズ, 先に赤外線カットのフィルターを入れた fiber optic によるライトガイド。付属品は, $f\#/1.2$, 55 mm のカメラに取り付けられ, 他端は通常のフラッシュ装置に連結された。

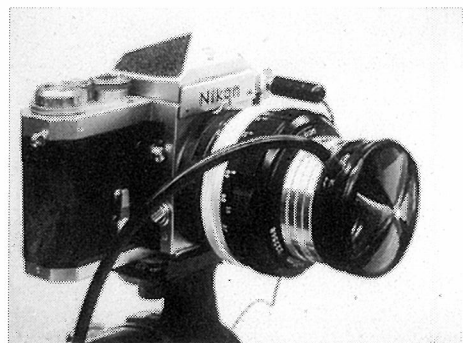


図2 カメラに取り付けられた, 直交フォトレフラクトメータの付属品

私はビルに、ドイツでの魚の研究について話した。彼は私のストーンブルックでの地位を押し量り、「博士号がなくてはどこにも行けないぞ。コーネル大学に来れば、君の研究をまとめて、急いで学位をあげるよ」と言ってくれた。彼は更に、私の妻モニカに、彼の生物学のコースで研究室の助手の仕事を紹介してくれた。

こうして私はコーネル大学で、Ph.Dの研究を1年間行い、1968年9月に博士号を授与された。卒業に伴い、比較的新しく設けられた神経生物・行動学の講師になった。3年後、雇用再契約の時期がきて、私はそれまでほとんど何も論文を出していないことに気が付き、教職員である私の友人は、私に1年間の臨時職員のポジションを与えるために苦戦しなくてはならなかった（私はとても世間知らずだったので、学術界ではコンスタントに論文を発表しなくてはならないということを理解していなかったのだ）。

急遽論文を量産するために、モニカ、私と3人の息子は1971~1972年にかけて友人のHorst Mittelstaedtの再度の招きを受け、1年間コーネル大学を離れた。我々家族はSeewiesenに移り、そこで助手職を得て、研究成果を論文にまとめることができた。上の2人の息子フランクとヤコブは、Starnbergの公立学校に通ってドイツ語を再学習し、最終的には素晴らしい成績を修めることができた。ただし英語だけは例外で、読み書きが英国的でなくアメリカ的であるために低い評価しか与えられなかった。

その年に私が書いた論文のなかに、ブラッドフォードとの検影法に関する論文がある¹⁾。その年にSeewiesenに持ってきた機械は、ブラッドが設計した吸光度計と、私の研究での計算処理に大きな役割を果たしたテレタイプ付PDP 8コンピュータであった。

我々は、直交検影法パターンの四つの直交する腕の光量分布を持ってきた吸光度計を使って計測し、この測定値がディフォーカスの関数の理論的な曲線と関係することを期待した。

しかしながら、結局我々は、腕の長さは下記のような公式に従うディフォーカスの尺度になると考えた。

$$\text{Defocus (D)} = \frac{\text{四つの星の腕の長さ}}{2gFpa} \dots\dots\dots (1)$$

g: シリンダーレンズの度数

F: カメラレンズの焦点距離

p: 瞳孔直径

a: 被検者とカメラの距離

この公式はその後、光線追跡の結果、シリンダーレンズのプラス度数と、シリンダーレンズとカメラレンズの主平面間の間隔が、ディフォーカスが正、負どちらであるにもかかわらず、ディフォーカスに異なる影響を与えると気が付き、少し修正された。

その後、公式(1)はディフォーカスの符号については何も触れていないことに気が付いた。そして当然ながら、眼のディフォーカス量だけでなくその符号を決めることは、我々が何としても解決しなかった問題であった。

コーネル大学から離れてドイツで過ごした1年は、論文を8編書き上げることができ成功であった。その結果、再度2年間の職を得ることができ、その後、大きな教官の間での論争と、更にいくつもの上部機関での決定を経て、私はテニユアーと助教授の地位を得ることができた。

こうして私は1年のサバティカルを得ることができた。年長の息子達は2人とも大学生になり、妻のモニカ、一番年下の息子デイビットと私は5カ月をドイツで過ごし、私は技術高等学校の医療光学研究所でRainer Roehlerと働き、その後、8カ月は英国のケンブリッジの生理学部のFergus Campbellの研究所で過ごした。

サバティカルの準備として、私は国立科学基金からの助成金応募書類の作成で、網膜検影法で反射する眼底の層を測定する試みについて提案した。Roehler, Campbellともこのテーマについて論文を書いており^{2,3)}、彼らの持っている装置とアドバイスがあれば、この問題は解けると思っていた。

2人の審査員の評価はとても面白かった。両者とも、この問題は非常に重要な問題であることを認めていた。しかしながら、一人目の審査員は、この問題は難しいものではなく、1カ月もあれば解決されてしまう類のもので、1年間の助成の価値はないという意見であった。二人目の審査員は違う意見だった。彼（または彼女）の意見は、この問題は非常に難しく10年かかってでも解決できないと思われ、とても1年では解決可能ではなく、つまり1年間の助成は価値のないことというものであった。助成プログラムの責任者は、2人の審査員が補助金を受ける価値がないという点では同意しているので、補助金は受けられないと言った。結局、ほとんどのサバティ

カルで必要とした費用は、それまでの私の教育費と同様、私の両親に負担してもらってしまった。

寛大にも私を受け入れてくれた Roehler の研究所で、眼の光学的性能を測定するための装置は、分解されてから長い時間が経っていることがわかった。こうして、私は眼の周波数伝達関数を測定するための photographic double-pass line spread 法を開発する研究を行った⁹⁾。私はこの方式を発表すべきだと考えたが、Roehler は、この line spread 法で実際の結果が出るまで公表は控えたいと考えていた。私はそのとき、眼底反射の原因についてあまり学んだことがなかった。ここでの5カ月はすぐに過ぎ、私は新しく購入したフォルクスワーゲンを駆って、英国にある Campbell の研究所へ移った。

ケンブリッジにある Campbell の研究所でも、測定装置がないことがわかり、私は執筆に必要なデータ取りのために line spread 装置を再度組み立てた。ここではあまりスペースがなかったので、この機械はかなり邪魔になった。私は、コントラストに対する眼の感度についての学位論文を書き終えたばかりの Arthur Ginsburg と部屋をシェアしていた。それより前に、Campbell と Gubisch は少ない人数の被験者を用いた、眼の光学的性能についての論文を発表していた³⁾。彼らは、人間の瞳孔領の回折限界の径は約 2.2mm であると述べていた。私は、line spread 法を用いた測定で私の被験者の一人の回折限界が 5mm もあることが示されたことをみて、驚いてしまった。これにより、正常眼の光学性能は人によって大きく異なるということが初めて示された。

しかし、ここでは検影法 (photorefraction) の話に戻ろう。Oliver Braddick と Jan Atkinson は、ケンブリッジの視覚心理学者で、光学系をも含めた、人間の全視覚系の発達について非常に興味をもっていた。彼らは私の検影法の JOSA の論文を読んでいて理解してはいなかった。考えてみれば、この記事を理解している人は今までに誰もおらず、私はいつも相手が原理を理解するまで、装置を実際に使ってみせなければならなかった。同じことが、ブラッドフォードと私のクロスシリンダー収差計についてもいえた⁹⁾。

とにかく、Oliver と Jan は、幼児が眼の焦点をどこに合わせるかということを調べるために幼児の眼の検影法による屈折測定に非常に興味をもっていた。私は彼らに原理を説明し、共同で測定することに合意した。我々はまた、天文学の光学研究所へ行き、

直交フォトレフラクトメータをもう1台作製してもらった。そこでは何と、シリンダーレンズの部分で、技術者が真鍮のかけらと研磨剤を使いながら3時間もかけてガラスを磨いて造っていたのだ。

そのころ、モニカの両親が私達のもとを訪れ、私は義父にフォトレフラクトメータを動かすためのフラッシュガン借りた。以前私達は、光ファイバーと同期シャッターを用いた複雑な仕組みを使っていたが、驚いたことに、光ファイバーの一端をフラッシュガンに対して向けると、50~55mm の焦点距離で、ISO 400 のフィルムを使って、反射の撮影が簡単にできる十分な強さの光が得られたのだ。

私達は Trumpinton 通りにある研究所と、Jan が娘の出産の際に一時的に入院していた産婦人科病院で子供達の撮影を始めた。これらの測定には、現像に E-6 プロセスを使用する Ektachrome フィルムを使用した。私達が最初に発見したことの一つは、反射の「星の腕」の端に縞模様の色に気を付けることによって、ディフォーカスの符号が決められるということであった。赤い縞は遠視のディフォーカスを、青い縞は近視のディフォーカスを示していた。

Braddicks と一緒に仕事をしていた技術者は、私達の研究のために新生児を探してくるのが非常に上手であった。彼女は、新生児の赤ちゃんを、私達の研究のために30分間使わせてもらい、しかも眼の届かないところに見知らぬ人に連れて行かれることを、母親に説得してくれた。そこから更に数カ月、産婦人科病院での仕事を続け、出生後1年間の調節の発達に関してとてもよい構想を得るのに十分な新生児の屈折測定を行うことができた。

私達は、いままでとは別の方法でディフォーカスの符号を評価できることを発見した(実際にはすでにブラッドフォードが気付いていたことを再発見した)。瞳孔間の距離を正確に測定できる方法を探して、

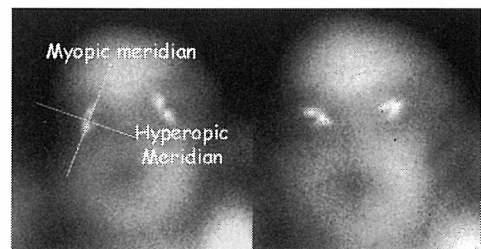


図3 乱視のある小児の photorefraction 像
左：幼児の後方に 1/2D defocus した場合の像
右：幼児の前方に 1/2D defocus した場合の像

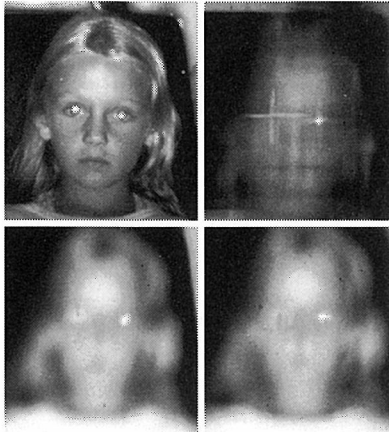


図4 上左：写真検影法による写真
上右：直交 photorefraction 法による写真
下左，右：遠方および近方に defocus した場合の写真

私達はそこそこ、被写体の瞳孔にピントを合わせ、レンズの中央に置いた光ファイバーからの光を用いて、いわゆる瞳孔の写真を撮っていた。しかし、偶然焦点位置が被検者の後や前になったとき、非常に不思議な反射が起こることに気が付いた。

図3に、乱視の赤ちゃんの写真が2枚ある。左の写真は被写体に対して1/2D後に、右の写真は1/2D前に焦点を合わせたものである。

カメラの焦点が、被検者の後にあるとき（「遠方」写真）では、近視側の子午線が長くあらわれ、被写体の前に焦点を合わせている（「近方」写真）では、遠視をあらわす子午線が長く見える。この幼児は斜乱視をもっている。

撮影した写真を現像してくれる写真屋さんに行くたびに、そこの店主に毎回「カメラのピントが合っていない」と説教され、大変な思いもした。

この年、幼児の屈折検査を繰り返し行ったことからの主な発見は、幼児はかなりの乱視があるということであった。このことはすでに、MITのRichard Heldの研究所に勤めている、あるオプトメトリストが発見していたことである。彼女は、ARVOにてこの報告を行い、上席の科学者から非難された。その科学者は彼女に、「幼児は乱視をもたないということは周知の事実だ」と告げた。

我々は、自分達でも図3のような多くの写真を見て発見していたことであるので、Held達のグループと協力することにし、幼児期の乱視についての論文を雑誌サイエンスに発表した^{6,7)}。

Braddick と Atkinson は、英国で幼児と小児の屈折の発達について広範囲にわたる研究を行い、私はついに NIH から、同様の研究を米国にて行うための研究資金を得た。1983年に検影法について述べた論文⁸⁾のために我々は最後の共同研究を行った。その後、検影法のパイオニアである Kaakinen⁹⁾は、ディフォーカスの符号と、屈折を測定している眼の軸（vertex normal）を示す第一ブルキンエ像を含んだ、屈折に関する情報を示したことで非常に有名になった。図4に、三つの方法（orthogonal photorefraction（直交フォトレフラクション）、isotropic photorefraction（等方フォトレフラクション）、photoretinoscopy（写真検影法））が示されている。

この被検者は不同視である。写真検影法を用いると、瞳上方での反射が、また直交フォトレフラクションを用いると星の腕が非常に長くなり、カメラの焦点をわざと被写体の後に合わせた「遠方写真」では、同様に「近方写真」よりも瞳孔が明るく輝いてみえることからわかるように、彼女の右眼は強い遠視である。写真検影法では、反射は瞳孔の下の部分からきているため、左の眼は近視気味であることがわかる。しかしながら、他の3枚の写真では、わずかに乱視傾向がみえるとともに焦点位置も変化していたに違いない。

文 献

- 1) Howland HC & Howland B: Photoretinoscopy, a technique for the study of vision from a distance. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 62: 1403, 1972.
- 2) Roehler R: Informationstheorie in der Optik. Stuttgart, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft MBH, 1967.
- 3) Campbell FW & Gubisch RW: Optical quality of the human eye. *J Physiol* 186: 558-578, 1966.
- 4) Howland HC & Roehler R: Photographic measurement of linespread of human eye. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 67: 1407, 1977.
- 5) Howland B & Howland HC: Subjective method for the determination of aberrations of the eye. 1974.
- 6) Howland HC, Atkinson J, Braddick O & French J: Infant astigmatism measured by photorefraction. *Science* 202: 331-333, 1978.
- 7) Mohindra IR, Gwiazda HJ & Brill B: Astigmatism in infants. *Science* 202: 329-330, 1978.
- 8) Howland HC, Braddick O, Atkinson J & Howland B: Optics of photorefraction: Orthogonal and isotropic methods. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 73: 1701-1708, 1983.
- 9) Kaakinen K: A simple method for screening of children with strabismus, anisometropia or ametropia by simultaneous photography of the corneal and the fundus reflexes. *Acta Ophthalmol* 57: 161-171, 1979.

解 説

第33回 視能訓練士国家試験問題解説

(眼光学・屈折・調節関係)

東京医科歯科大学 所 敬

第33回視能訓練士国家試験は平成15年3月7日に開催された。ここに、眼光学・屈折・調節関連問題の解答と解説を述べる。

午 前

5 検影法で開散光束を用いた場合、被検眼から40 cmの距離で中和した。乱視は認められなかった。検者は正視である。

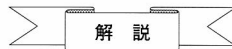
次の問いに答えよ。

1. 屈折度はいくらか。
2. 50 cmの距離で検査すると、同行、逆行のいずれの動きが観察されるか。
3. 50 cmの距離で中和に必要なレンズはいくらか。

解答：1. -2.50 D

2. 逆行

3. -0.50 D



1. 検影法は通常50 cm (2.00 D)で行う。この距離で中和すれば -2.00 D の近視である。40 cm (2.50 D)で中和すれば -2.50 D である。
2. 50 cmで検影した場合、遠視、正視、 -2.00 D 未満の近視では同行、 -2.00 D の近視では中和、 -2.00 D を超える近視では逆行する。したがって、 -2.50 D の近視では逆行する。
3. 50 cmの距離で中和するのは -2.00 D であるから -0.50 D を入れればよい。

午 後

4 点眼薬と作用時間の組み合わせで正しいのはどれか。

- a. 1% 硫酸アトロピン ……………24時間
- b. 5% 塩酸フェニレフリン ……………24時間
- c. 1% ホマトロピン ……………12時間
- d. 0.5% トロピカミド …………… 4時間
- e. 1% 塩酸シクロペントラート ……… 2時間

解答：d


 解説

	検査までの時間	回復までの時間
1%硫酸アトロピン	約5日間	2～3週間
5%塩酸フェニレフリン	約30分	5～7時間
1%ホマトロピン	30分～2時間	24～36時間
0.5%トロピカミド	約30分	3～4時間
1%塩酸シクロペントラート	約60分	2～3日

上記にそれぞれの検査までの時間と回復までの時間を示す。作用時間とは回復までの時間と考えれば解答はdになる。

6 成人眼球の基準値で正しいのはどれか。

- a. 前房深度：10mm
- b. 角膜中央部の厚さ：0.5mm
- c. 網膜の厚さ：2mm
- d. 視神経の直径：8mm
- e. 水晶体の直径：5mm

解答：b


 解説

Gullstrandの模型眼によると、前房深度は3.6mm、角膜中央部の厚さは0.5mmである。網膜の厚さは後極部の厚いところで約0.3mm、周辺部で約0.1mm；視神経の直径は約3mm（視神経乳頭の直径は約1.5mm）；水晶体の直径は約9mmである。

13 2Dの遠視で、近点が眼前1mであった。

調節力はどれか。

- a. +1.0D
- b. +1.5D
- c. +2.0D
- d. +2.5D
- e. +3.0D

解答：e


 解説

2Dの遠視では無限遠を見るのに2Dの調節が必要である。更に眼前1mを見るには1Dの調節が必要で、合計3Dの調節力を要する。

14 視力1.0でかろうじて識別できるランドルト環の外径の視角はどれか。

- a. 30秒
- b. 1分
- c. 2分
- d. 5分
- e. 10分

解答：d

解 説

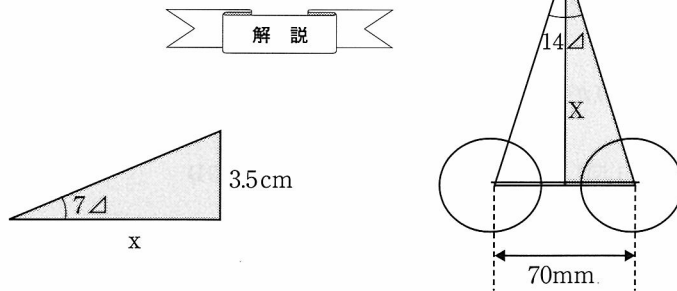
視力1.0のランドルト環の切れ目の視角は1分である。ランドルト環の外径はランドルト環の幅ならびに切れ目の5倍であるから、外径は5分になる。

- 15] 正しいのはどれか。
- a. 視力発達期の近視眼は弱視になりやすい。
 - b. 近視の矯正には凸レンズを用いる。
 - c. 遠視は調節しなくても遠方がよく見える。
 - d. 正視は生涯を通して日常視に眼鏡装用の必要がない。
 - e. 混合（雑性）乱視の矯正レンズは球面度数と円柱度数とが異符号である。
- 解答：e

解 説

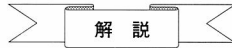
弱視になりやすいのは視力発達期に遠視や乱視があるときで、近視では弱視になりにくい。近視の矯正は凹レンズによる。遠視では遠点が眼球の後方にあるので、遠方をよく見るためには調節が必要である。正視でも調節力が減少したときには老眼鏡が必要になる。混合（雑性）乱視では球面度数と円柱度数とが異符号である。例えば $+1.00 D \ominus cyl -1.50 D 180^\circ$ 、 $-0.50 D \ominus cyl +1.50 D 90^\circ$ は混合（雑性）乱視である。

- 21] 瞳孔間距離 70 mm の人が眼前の視標を固視したとき輻湊角は 14^Δ であった。両眼の回旋点を結んだ直線から固視目標までの距離はどれか。
- a. 25 cm b. 50 cm c. 75 cm d. 100 cm e. 125 cm
- 解答：b



設問を図に示すと上のごとくである。ここで、灰色の部分を左に示す。 7^Δ とは1mの距離で7cmの光を偏向するプリズムである。この図のごとく、3.5cmの偏向であるから、xは1mの半分の50cmになる。

- 27] 30 cycles/degree の縞視力に相当するランドルト環視力はどれか。
- a. 0.01 b. 0.05 c. 0.1 d. 0.5 e. 1.0
- 解答：e



解説

縞視力では白と黒の縞で1 cycleを構成する。各々の幅を1分とすると1度の中に30 cyclesが入る。視標としては黒の縞を判別するので、測定された縞視力 30 cycles/degree をランドルト環視力に直すには30で割ればよい。

波面変換素子

((財)工業所有権協力センター) 松村 勲

1. はじめに

画像撮影装置の進歩に合わせた画質の向上は、拡大撮影などいわゆる撮影レンズの性能の向上やレンズを保持する技術レベルの向上で対処してきた。しかしながら、画像の撮影は撮影手段の向上のみならず撮影装置そのものの特性や中間に介在する媒体により性能が大きく左右されるため、受動的な撮影レンズの収差補正のみではもはや画質の向上が期待できなくなってきた。ここで登場してきたのが、光補償光学(アダプティブ・オプティクス)と呼ばれる概念である。

これは、物体からの光を光学系で集め、結像光学系と波面センサーに分配し、波面センサーに入射した光の波面の位相(収差)を測定し、波面復元装置を用いて結像光学系の収差を補正するべく波面変換素子を駆動するものである。

このように波面形状を制御し変形させることにより収差補正を行い、更なる画質の向上を図ろうとする光学装置の考えは、当初天文学の分野でとくに注目を浴びてきたが、近年、顕微鏡、画像記録装置、眼科器械等への適用も盛んになってきた。

これらの光学装置の主役を担うのが波面変換素子であり、その中心的役割を果たしているのがデフォーダブルミラーや液晶型の位相変調素子である。

デフォーダブルミラーは複数の領域に分割された微小ミラーを個々にコントロールすることで収差を相殺し、光学性能の低下を防ぐものである。

一方、液晶型の位相変調素子はガラス基板に挟み込んだ光変調部としての液晶層に電圧を加えることにより液晶分子を傾け、光の位相を2次元的に変調するものであり、波面補正素子としてデフォーダブルミラーのようなピクセル構造をもたない。

ここでは、最近の公開特許広報を参照しながら、眼科装置を中心に各種光学機器における波面収差補正に至る過程と、波面変換素子の適用例について眺める。

2. 顕微鏡

従来レーザー走査型顕微鏡は、標本もしくは対物レンズを光軸方向に移動させて、標本の光学像を順次取り込んでいたが、機械的移動のため位置制御誤差や再現性等の点で正確性に難があり、また対物レンズを直接生体または培養液に浸けて生体の動きを観察する場合には、対物レンズを移動すると、振動等のために標本に悪影響を与えた。

この問題点を解決するために、まず、レーザー集光光学系においては、ビームの走査は機械的な手法を用いず、光学的にパワーを可変にできる波面変換素子を用いて行い、更に、その際発生する収差は波面変換素子で相殺し、光学性能の低下を防ぐ手法がとられている。

「図1はレーザー集光光学系への適用例で、レーザー光源と、該レーザー光源から出射されたレーザービーム301を適切なビーム径にコリメートする光学系302と、前記レーザービームを標本312上に集光する対物レンズ310とを備えたレーザー集光光学系において、前記対物レンズ310と標本312の距離を相対的に変わらないようにして光軸方向の集光位置を変えていく際に、対物レンズの瞳位置311又はその近傍において、光線が入射する領域の90%以上の領域で形成される波面

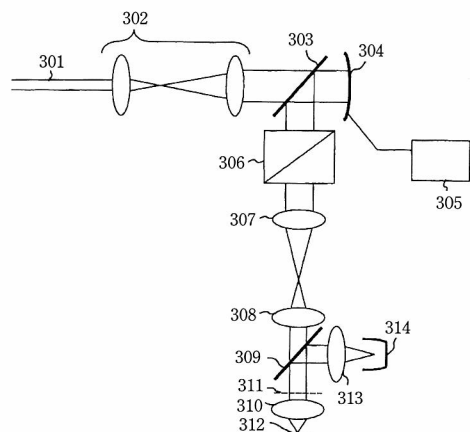


図1 レーザ走査型顕微鏡構成図

形状が前記対物レンズの瞳面311と共役な位置又はその近傍に配置された波面変換素子304によって変形されている。

これにより、対物レンズと標本の距離を相対的に変わらないようにして光軸方向の集光位置を変えていく際においても、そのために発生する球面収差を軽減することができる。

本例では、波面を任意の形状に変えることのできる波面変換素子304がデフォーダブルミラーで形成されており、制御装置305でそのデフォーダブルミラーの形状が制御される。」¹⁾

3. 画像装置

プリンタ等のデジタル露光光学系では、レーザビームを主走査方向とこれと直交する副走査方向に偏向することにより、記録媒体を2次的に露光していたが、近年、ディスプレイやモニタ等の表示手段として用いられる液晶ディスプレイ（以下、LCD）やデジタルマイクロミラーデバイス（以下、DMD）等の2次元空間光変調素子を使ったデジタル露光光学系が提案されはじめた。

「図2は画像露光装置への適用例で、2次元空間光変調素子とエクスターナルドラム（外面ドラム）を用いて、記録媒体である感光材料を2次的に走査露光する装置であり、光源部12と、均一照射光学

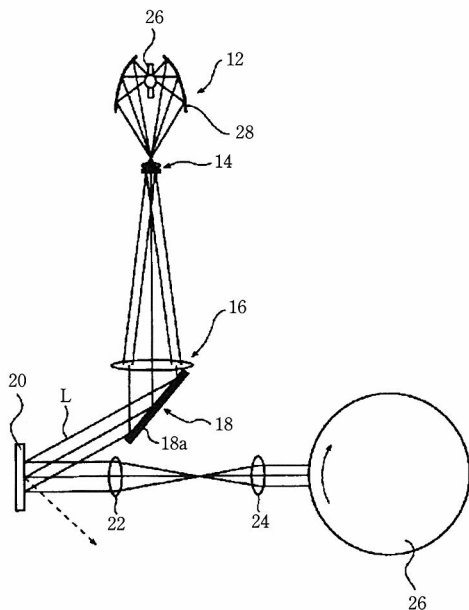


図2 画像露光装置構成図

系14と、光コリメータ16と、ミラー18と、2次元光変調素子であるDMD 20と、コリメートレンズ光学系22と、フォーカシングレンズ光学系24と、エクスターナルドラム26とを主に有し、その他、図示されない副走査駆動系を有して構成される。」²⁾

これにより、コリメートレンズ光学系とフォーカシングレンズ光学系のレンズの歪曲収差によって生じる画像の歪みやムラがなくなり、広い領域において高解像度で正確な露光を実現できる。

4. 眼科機器

眼鏡やコンタクトレンズについては現在、デフォーカスや乱視以外の諸収差は十分には補正されず放置されている。こうした眼の複雑な収差は網膜上に形成された像をぼやけさせ視力を悪化させる。眼のデフォーカスや乱視以外の諸収差を補正するには複雑な眼の収差の量的測定が必要不可欠であるが、これをなし得なかったことや眼の収差を補正する仕組みが解き明かされていなかったことに起因する。

従来の自他覚眼屈折測定ではデフォーカスや乱視度数しか測定されなかったため、これらの方法では完全な形で眼の収差を測定することはできず、したがって従来の眼鏡では補正されずに放置されていた。ただ、この点については眼鏡レンズの加工上の制約もあり、一概に収差測定技術のみのせいにするこ

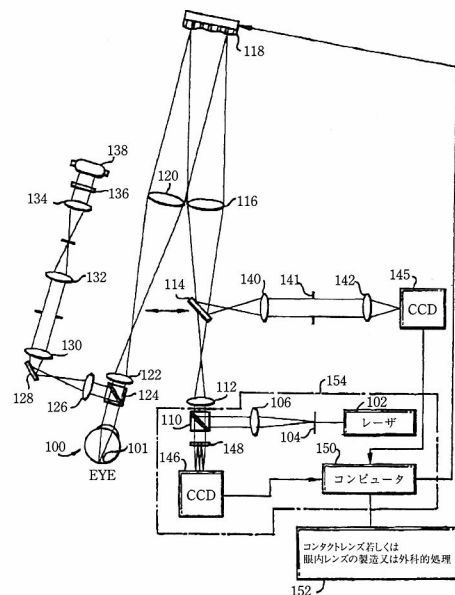


図3 視力および網膜画像解像改善装置構成図

はできないが、近年、非球面製作技術の向上により自由度は増してきている。

「図3は視力および網膜画像解像改善装置への適用例である。レーザービーム(102)により生体眼(100)の網膜(101)上に点光源が作られる。網膜で反射されたレーザービームはハルトマン-シャック波面センサ(148)のレンズレット配列が受け取り、各々のレンズレットはレンズレット配列に近接して配置されるCCDカメラ(146)上に網膜点光源の空中画像を形成する。CCDカメラからの出力信号はコンピュータ(150)が受信し、そこで信号を処理して補正信号を発生させ、その補正信号は変形可能な鏡(118)のような補正光学的装置もしくは波面補正装置を制御するために使用される。またコンタクトレンズや眼球内レンズを成形加工するため、もしくは眼の収差補正用の外科手術を導入するためにも使用される。これらの方法はいずれもデフォーカスや乱視以外の収差を補正することが可能であり、その結果視力または眼の内部の画像が改善される。」³⁾

図4は眼底カメラへの適用例である。形状可変鏡と波面センサーを組み合わせた補償光学系に代わる原理として、波面の計測と位相変調素子の駆動を同時に行う光フィードバック干渉法に基づく液晶補償光学系を用いて小型化やコストダウンを図っている。

「ハロゲンランプからの白色インコヒーレント光はレンズL1, ウエッジWP1, ビームスプリッターBS1を経由してPOを広い範囲で一様に照明する。POで反射された照明光はBS1, 結像レンズ系L2, L3, ビームスプリッターBS2, ウエッジ板WP2,

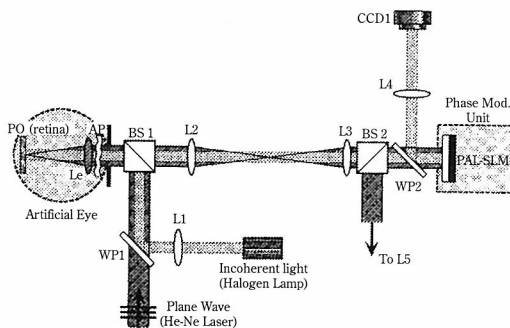


図4 網膜イメージング光学系

液晶空間光変調器 PAL-SLM の R 面及びレンズ L4 を経由して CCD カメラ CCD 1 に到達する。この光学系で PO と CCD 1 がまた、収差 (以下 AP) と液晶空間光変調器の R 面がそれぞれ結像関係となるように配置される。そのため収差がない (AP が存在しない) 場合には、CCD 1 には鮮明な PO (網膜) の像が写し出されることになる。しかし、一般には AP の影響により CCD 1 で撮影される PO の像は不鮮明になる。この問題は AP を通過する際に受けた照明用の光波の歪を位相変調素子によってうまく相殺できれば解決する。言い換えると、AP の影響を適応的に除去するように液晶空間光変調器が補償光学素子として動作すると原理的には CCD 1 上で鮮明な網膜 (PO) 像を得ることが可能となる。」(2002 年第 5 回光波シンセシス研究会講演予稿集)

しかし、この光学系の動作には網膜観察撮影のための白色インコヒーレント光と補償光学システムを駆動するための直線偏光の単色コヒーレント光が必要である。

5. ま と め

DMD には制御信号に応じて反射面の角度が変化する多数のマイクロミラーがシリコンなどの半導体基板上に 2 次的に配列されたミラーデバイスが用いられ、SRAM (メモリセル) 上に微小ミラー (マイクロミラー) が支柱 (ヒンジおよびヨークを含む) により支持され配置される複雑な構造であることから、どうしてもコスト面で厳しくなる。一方、液晶空間光変調器では補償光学系を駆動するための単色コヒーレント光が眼の収差情報をどれくらい正しく補償光学系に伝えて補償光学系に正確な動作をさせているにかかっている。

今後、眼科撮影装置も 2 次元空間光変調素子を用いて眼球の諸収差を白色光で収差補正した実用的な装置に展開してゆくものと思われる。

文 献

- 1) 公開特許公報 (特開2001-166213)
- 2) 公開特許公報 (特開2003-66540)
- 3) 公表特許公報 (特表2001-507258)