

## 視覚系の特性と高齢化による劣化

帝京大学 医療技術学部 視能矯正学科 教授

小李克彦 KOBAYASHI, Katsuhiko

(当協会 眼光学チュートリアルセミナー実行委員会委員,  
及び「眼光学チュートリアルセミナー」講師)

映像機器の最近の進歩は目覚ましく、家の中では4K, 8K, VR, 車に乗れば高機能ナビや高機能ミラー, 等に囲まれて、高齢者の仲間入りをした身にとっては、増大する情報量についていけるのか不安を感じている今日この頃である。さて、映像は人の視覚系に入って初めて生きた情報となるので、視覚系は映像情報系に於いて重要な役割を持っていると考えることができる。しかしながら、現状では、性能が劣化した視覚系を持つ高齢者が増えているのである。この度、本誌“焦点”執筆の機会を頂いたので、視覚系の最も基本的な特性と、その高齢化による劣化とについて、ポイントをお伝えしたい。映像情報機器の開発の課程で、少しでも気に留めて頂ければ幸いである。

### 1. 全視覚系とその特性

人がものを見て、それが何であるのかを認識するまでの過程である全視覚系は、光が伝わる角膜前面から網膜視細胞までの眼球光学系と、視細胞で電気信号に変換された情報が伝わるそれ以降の網膜－大脳神経系とに分けることができる。前者は、物理量として扱うことができるが、後者は心理物理量として扱う。視覚系の空間周波数伝達特性（以降はMTF: Modulation Transfer Function）は、眼球光学系はローパスだが、網膜－大脳神経系は、中間周波数をよく通すバンドパスなので、結果として、全視覚系は図1<sup>\*1</sup>に示すようにバンドパスの特性になっている。この全視覚系が、十分な照明下で最も敏感に感じる周波数は、正弦波パターンで6 cycle/degree, 小数視力値に換算すると0.25程度となる。なので、例えば、4K, 8Kのテレビ画面を見ているとき、映っている人物の髪の毛が一本一本はっきり見えると言われてみれば確かに見えるが、ぼーっと見ている限り、最も注意が行くのは見る距離にもよるが、ドラマに登場する人物の顔の輪郭や造りのような、1Kでも問題のない大きなパターンのはずである。

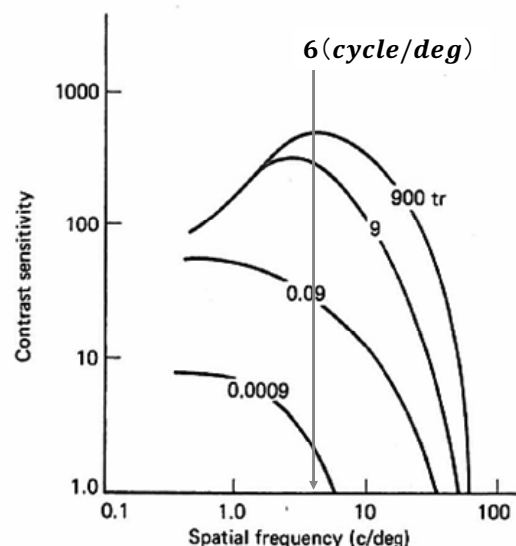


図1 全視覚系のコントラスト感度特性。  
パラメーターは網膜照度。

### 2. 眼球光学系の特性

次に、眼球光学系の基本的な光学性能である解像限界、即ち、2点を2点として分離できる最小分

離閾について。日常生活での通常の瞳径  $\phi 3\text{mm}$  における光学系としての解像限界は回折理論 (wave theory) により網膜位置で約  $4\mu\text{m}$  である。また、網膜のセンサーとしての解像限界は、最も視力が良い黄斑部における錐体細胞の密度によって決まっていて (receptor theory), これもやはり約  $4\mu\text{m}$  とされている<sup>\*1</sup>。解りやすいように白黒の縞パターンに換算すると  $30\text{ cycle/degree}$ , 小数視力値にして 1.2 程度となる。光学系と網膜とが何れもオーバースペックにならないようにバランスよくできていると言える。なので、副尺目盛を読むような場合を除き、通常の観察に於いては、小数視力値 1.2 以上が必要となるような高精細の映像情報の提示は意味が無いということになる。

### 3. 高齢化による眼球光学系の劣化

心理物理量として扱う網膜—大脳神経系は、劣化の程度を他覚的 (客観的) に測定することが容易ではないが、物理量として扱うことができる眼球光学系は、それを比較的容易に測定することができる。そこで、眼球光学系に付いて、加齢に伴い確実に劣化するポイントを述べることにする。

#### 3-1 高齢化に伴う眼球光学系 MTF の劣化

完全矯正した眼球光学系の 23 歳と 60 歳の健常眼、及び 84 歳白内障眼に付いて、MTF とその MTF からシミュレーションにより推定した網膜像を図 2<sup>\*2</sup> に示す (瞳径  $\phi 4\text{mm}$ )。23 歳と 60 歳の健常眼については、いわゆる自覚視力値に相当する解像限界は、何れもそれほど差はないが、MTF が 60 歳では全体的に低下しているのが、高齢になると常にコントラストの低い世界で暮らしていることが推察できる。それがあまり気にならないのは、何十年もかかって徐々に進んできた劣化に慣れてしまっているからである。このコントラストの低下は、主に水晶体の光学特性の劣化に起因すると考えられている。84 歳白内障眼では MTF がさらに低下し、さすがに解像限界も落ちてくるので、これを人工水晶体に置き換えること (白内障の手術) が必要になる。これにより、一定の距離にある物体を見たとき、ある程度のコントラストを取り戻すことが可能になる。なので、運転免許証の更新では、自覚視力値だけでなく、MTF も評価して視機能の衰えの自覚を促すべきである。

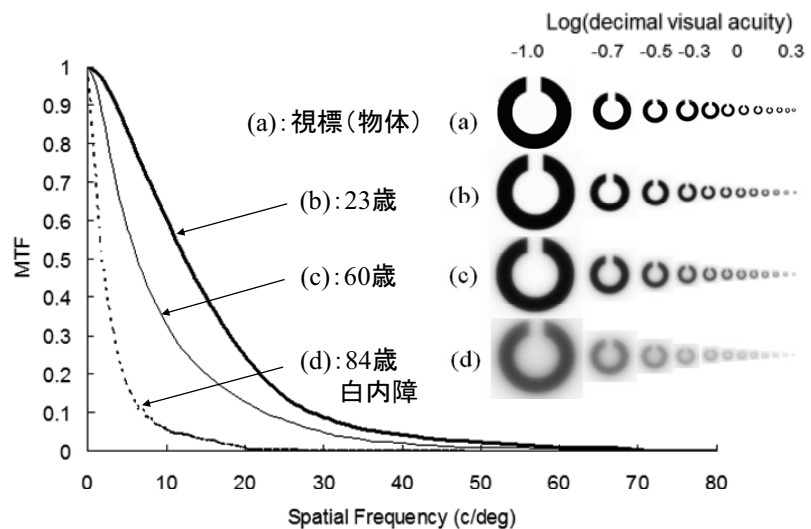


図 2 年齢による眼球光学系の MTF とシミュレーション網膜像。

#### 3-2 老視

さらに、現在の医療技術では老視 (老眼のこと) が完全には解決されていない。若年者は、水晶体前面の曲率半径を大きく変化させてその屈折力を変えることで、正視眼 (眼鏡を使用せず、且つ、調節せずに無限遠に焦点が合う眼), あるいは完全矯正眼 (眼鏡を使用して正視眼の状態になっている) であれば、遠くから近く迄、焦点を合わせることができる。これを調節力というが、加齢に伴って、水晶体の弾性が失われることで、この調節力が小さくなり、見たい距離に焦点を合わせにくくなる。10 歳くらいまでに視覚系の機能が完成すると言われているが、この時点での調節力は約 13 ジオプトリ (13 D) で、無限遠 (この位置を遠点という) から眼前  $1/13 = 0.077\text{m}(=77\text{mm})$  (ここ位置を近点という) 迄、焦点を合わせることができてしまう。ところが、60 歳になると、調節力は僅か 1 D 程度になってしまうので、焦点を合わせることができるのは、無限遠から眼前  $1/1 = 1\text{m}$  となる

(以上、図3\*1参照)。ここで、ジオプトリー (D) は、焦点距離 (m) の逆数である。もはや、新聞を手の届かないくらい遠くに離さないと焦点が合わないし、焦点が合うように新聞を遠くに置くと今度は文字が小さすぎて読めない、という状況に陥る。ここに至って、近点をもっと手前に引き寄せるために老眼鏡が必要になる。1 D の老眼鏡を使うと、自分の調節力と併せて 2 D の調節ができることになるので、近点は  $1/2 = 0.5\text{m}$ , 3 D の老眼鏡を使うと、 $1/4 = 0.25\text{m}(250\text{mm})$  となり、手元の新聞が楽に読めるようになる。もともと、マイナス 3 D の近視眼では、遠用の眼鏡がないと遠くに焦点が合わないが、逆に、遠用の眼鏡を外せば自分の調節力と併せて  $1/4 = 0.25\text{m}(250\text{mm})$ にある新聞に焦点を合わせることができる。あるいは、小さい文字を大きくするための拡大鏡 (虫眼鏡) を使うようになる。ちなみに、老眼鏡も拡大鏡も使い方が違うだけで、基本的には同じ凸レンズであり、最近話題のハズキルーペも 1D~3D 程度の凸レンズである。なので、高齢者は、例えば、車の後方の映像を高精細で表示してくれる高機能ルームミラーに、通常の状態では焦点を合わせることができない。

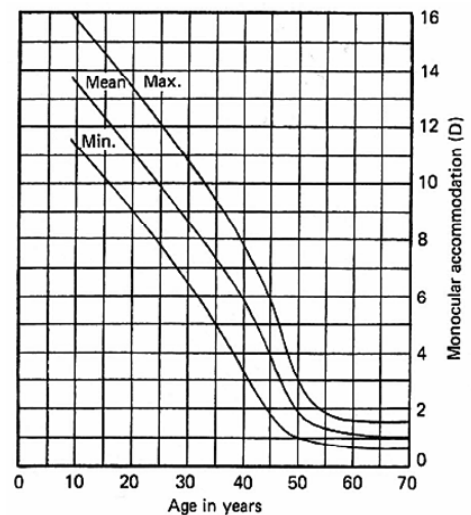


図3 加齢による調節力の減衰。

#### 4. まとめ

つまり、視覚系を含めた映像情報系の高機能高精細の性能は、眼球光学系の光学性能で制約され、高齢者に於いてはその性能がさらに低下するということである。網膜―大脳神経系を含めて、考慮しなくてはならない要因は、さらに多くあるが、猫に小判の状態になりかねないこのミスマッチの解消が、今後の高齢化社会に於いては、重要な課題になり、延いては価値ある製品の開発に繋がるかもしれない。

JOEM (一般社団法人日本オプトメカトロニクス協会) では、その眼球光学系を臨床面と光学面から学ぶ「眼光学チュートリアルセミナー」を 10 年以上前から毎年開催しているが、残念ながらエンジニアの参加が今一步である。眼球光学系に関する知識を広く取得できるチャンスを逃しているのは実にもったいない話である。特に、これからの日本を担う若いエンジニアの方には、是非とも JOEM を有効に利用し、人の視覚系と調和した映像情報機器の開発に繋げて頂きたいと願う次第である。

#### 引用文献

- 1) Bennett & Rabbetts, "Clinical Visual Optics" pp.20-22, and p.52 fig3.34, p.118 fig7.7 より改変, Butterworth-Heinemann Ltd, London, 1998
- 2) K.Kobayashi, M.Shibutani, G.Takeuchi, K.Ohnuma, Y.Miyake, T.Noda, K.Negishi, K.Ohno, "Calculation of Ocular single-pass modulation transfer function and retinal image simulation from measurements of the polarized double-pass ocular PSF", fig8,9, Journal of Biomedical Optics Vol.9, No.1, pp:154-161,2004 より改変

#### 参考：

ディスプレイと視覚系との関係については下記に詳しい記載がある。

共創企画 (代表：中條博則氏) ホームページ (<https://www.reflowablecamera.com/>)