

特集 色を見る仕組みを探る ～色覚研究最前線～

色覚の加齢効果

Aging Effects on Color Vision

篠森 敬三 Keizo Shinomori 高知工科大学 Kochi University of Technology

1. はじめに

高齢化社会の到来により高齢者に快適な環境の構築が強く要請されている。その中で視環境の整備発展も重要課題である。そのためには加齢によって人間の視覚系にどのような変化が生じるかについて知る必要がある。本稿では特に色覚に焦点をあて、加齢による変化について検討する。ただ一口に加齢効果といっても、いわゆる正常な老化と老化による病理とを区別するのは、現実的には容易ではない¹⁾。また加齢性黄斑変性などによって生じるロービジョンの問題²⁾など、老化による病理自体について対策を考えることも、高齢者全体の快適性を考える上で、大変重要である。しかしここでは、一般的な意味での正常な老化による色覚の変化に限定して考える。

人間の視覚系は光に対する感度を最適化するように進化してきた。そのことは高強度光に対するダメージに弱い組織であることも意味する。実際に、光酸化損傷³⁾などの破壊のプロセス⁴⁾にさらされており、多くの目の組織では、連続的に組織を補修することによって光照射によるダメージを最小にしている。このように眼や網膜は、分子的に破壊と生成のプロセスのバランス中にある⁵⁾。そして、このバランスは残念ながら加齢により劣化の方向に進んでおり、さらに分解の失敗によって生じる脂褐素(lipofuscin)の濃度が増加するといった付帯的現象も影響する⁶⁾。それでも医学的に健康な眼は、眼底検査等によって観察される形態としては安定しており、基本的に中年まではほとんど何の変化も見受けられず、明らかな形態変化はそれ以降に観察される。

本稿では、まず生理学的な変化とそれによって生じる視覚系での直接的な影響・効果に着目し、さらにそれらが色覚にどのような影響を与えるかについて、心理物理学の実験の結果を検討する。最後にこ

れらの実験結果から予測される視覚系の補償メカニズムについて考察し、色設計などの応用面で考慮しなければならない点について考える。

2. 生理学的な変化

加齢によるさまざまな色覚の変化は、加齢による生理学的変化に最初の原因を持っている。そこで生理学的な変化とその影響について簡単にまとめる。

2.1. 眼光学的変化

加齢による眼光学媒体の濃度増加や、老人性縮瞳による瞳孔径の縮小によって、網膜上の刺激強度(網膜照度)が年齢とともに減少するとともに分光感度も変化する。これら2つの要因から、短波長刺激に対する角膜上での暗所視輝度感度の減少⁷⁾や、角膜上での短波長領域での明所視輝度感度の減少⁸⁾等の実験結果は良好に説明される。

幅広い年齢の被験者についてフリッカー(HFP)法で輝度感度関数を測定した結果^{9,10)}は、長波長側ではほぼ同じ形状になったが、短波長側では年齢とともに、感度が低下した。この変化は加齢による眼光学媒体濃度の変化とおおむね一致した。ただしHFP法では被験者間の絶対感度の違いを捉えることはできず、異なる波長間での相対感度しか求められない。錐体感度自体は低下はしている(次節参照)、これはL、M錐体の感度が同じ割合で減少していることを間接的に示している。ただし570nmで正規化した場合、高齢者の長波長側の輝度感度関数はむしろ増加するとの報告もある¹⁰⁾。輝度感度に関しては、水晶体の老化による短波長の相対感度低下を補償しておらず、逆にL、M錐体の分光感度を仮定することにより、眼光学媒体濃度をある程度の精度で予測することが可能である。等色関数¹¹⁾や色弁別¹²⁾の年齢による変化

も、眼光学媒体の吸収量の増加に影響される。色弁別については、100ヒューテストの得点において加齢による減少が見られ、一般的にその弁別能力の低下は、第3型色覚異常者(tritanopia)の場合と類似の結果となった^{13,14)}。このタイプの弁別能力の低下は若年被験者の目に短波長吸収フィルターを装着した場合でも観察された¹⁴⁾。

後で述べるように、眼光学媒体の濃度増加や縮腫により全ての加齢による変化を説明できるわけではない。しかし、データの精度や被験者間のばらつき量から考えて、自然視条件による(網膜前変化を制御しない)実験結果の場合には、この2要因による網膜上の刺激量変化により、加齢による色覚の変化の多くの部分を説明することが可能である。

また、減能グレア(disability glare)という現象があり、眼光学系における光透過の不完全性や、(量的に微少であるが)強膜や虹彩の透過光に起因する散乱光によって生じる¹⁵⁾。周辺視野に強い光源があり、見ている対象(刺激)のコントラストが低い時には、刺激のコントラストを下げてしまうので視認性が悪化する。これは、いらいらしたり気が散ったりという感覚をもたらすけれども、周辺視野にある明るい光源の照明効果自体を減じるわけではない不快グレア(discomfort glare)とは必ずしも同じものではなく、特に夜間の車の運転や太陽の近傍の目標を見る場合などの視認性に強い悪影響を与える点でより深刻である。減能グレアの年齢効果は $1 + [(年齢[年])/70]^4$ で良好に近似され¹⁵⁾、特に高齢者に顕著に生じることから、十分な配慮が必要とされる。

2.2. 受容体感度の低下

錐体の加齢による感度変化には、錐体の密度変化と個々の錐体の感度変化の両方が関与しうる。ただし錐体密度自体は、網膜中心部においては加齢によって有為に変化しない¹⁶⁾。ただ周辺部領域では、錐体密度の減少が報告されている¹⁶⁾。その一方、人間の錐体の視細胞外節では実質的な形状変化が生じており、外節小板の包旋状態の変化や外節の方向が無秩序になること、さらには錐体外節の長さの減少や小胞の縮退現象に見られるアライメントの変化が光量子吸収能力を減少させる¹⁷⁾。

これに伴う錐体の感度低下について、Stilesの2色法を用いてS、M、L錐体の角膜における感度の加齢による変化が心理物理学的に測定され¹⁸⁾、10歳から

80歳以上に至るまで錐体の種類によらず、10年間で約0.13 logの単調な感度低下が観察された。

S錐体の場合は、水晶体濃度の増加による影響が他の錐体よりも多く、その濃度増加の角膜感度低下に対する寄与量はおおよそ30-40%にもなる。またS錐体については、紫外線照射量が多い視環境にいた被験者ほど感度が低いとの報告¹⁸⁾や眼底検査で確認できる網膜病変を生じるのに必要な光エネルギーは短波長光の方が小さかったという報告¹⁹⁾から、S錐体がかつとも光照射や紫外線により損傷を受けやすいと考えられる²⁰⁾。これらによってS錐体においては、より大きな感度低下が生じるはずであるが、S錐体が関与するメカニズムにおいては経路上のどこかで感度が補償されることにより、各錐体の加齢による感度低下がほぼ同じとなると考えられている¹⁸⁾。

2.3. 受容体以降の変化

網膜上の神経節細胞については加齢による損失が生じ、網膜中心部11度の範囲では30歳台から70歳台の間でおおよそ15-25%の減少が見られる²¹⁾。ただし、桿体数の減少によっても神経節細胞につながっている桿体数は有意に変化せず、受容野の増大に伴い空間解像度は減少するものの信号レベルを一定に保つ作用がみられた²²⁾ことから錐体をめぐる神経接続もまた加齢とともに変化し、システム全体としての機能を補償していると予想される。

3. 加齢による色覚の変化

3.1. ユニーク色と色票の見え

輝度比視感度関数は加齢により変化した。それでは色の見えは、加齢によってどのように変化するかについて、様々な実験結果から考える。

SchefrinとWernerはユニーク色の加齢による変化を調べるため、視角1度、輝度が0.7、2.2、7.1 cd/m²の単色光刺激を用いて、13から74歳までの50人の被験者に対してユニーク青、緑、黄をあたえる波長を測定した²³⁾。この実験は自然視条件でおこなわれ、眼光学媒体濃度の増加などの影響は取り除かれていない。ユニーク青および黄色の波長には、加齢および刺激輝度による変化がほとんど見られなかった。これは赤緑反対色チャンネルに対する各錐体の出力が加齢とともに同じ割合で減少することを示しており、錐体感度測定実験の結果と一致する。一方、ユニーク緑の場合には加齢および刺激輝度の

両方に依存して波長は変化しており、各錐体の黄青反対色チャンネルに対する非線形的な入力を示唆している。しかし、被験者間のばらつきが大きいことから、さらに検討が必要である。

SchefrinとWernerがカラーネーミング法により、加齢によるOSA色票の見えの変化を測定した結果²⁴⁾は、青、緑、黄色、赤の色に対する評価は若年(平均21歳)と高齢者(平均72歳)で、ほとんど違わなかった。その一方、高齢者の場合は色み量に対する白み量(無彩色)評価の割合が有為が多く、これは刺激の明度が減少するにつれて明らかに増加した。これは加齢により、色のシフトはほとんど起こらないが、低明度の場合に彩度は低下することを示す。またSagawaとTakahashiが、カラーネーミング法により色カテゴリーの範囲を500 lxで測定した結果²⁵⁾でも、全ての色カテゴリー(赤、藍(紫青)、緑、黄色、青、黄緑、赤紫、灰色)においてValue5のマンセル色票群で示されるカテゴリー範囲は、50名の若年者の示す色カテゴリー範囲よりも、50名の高齢者が示す範囲の方が、特に彩度方向について明らかに小さくなった。これも加齢による彩度の低下、あるいは色の強さの低下を反映していると考えられる。

彩度の減少は、色チャンネルと無彩色チャンネルのバランスの変化によって生じた可能性がある。また、色評価の基準となる白色中性点の加齢による変化も考えられる。水晶体濃度の加齢による変化を考えると、特に短波長光を含む刺激において白色点が大きく変化することが予想されたため中性点の加齢による変化が測定された²⁶⁾。しかし、等輝度(10, 100, 1000 Td)を維持しながら各被験者ごとのユニーク青とユニーク黄色の混色比を変化させることで白色点を求める実験の結果、および600nmの単色光と(被験者平均白色点についての)その補色との混色で白色点を求める結果は、いずれも白色点が年齢により有為には変化しないことを示した(全平均はCIE(x, y)=(0.31, 0.31))。また彩度の差を、老人性縮瞳や水晶体濃度の違いで説明するべく、若年被験者において中性濃度フィルターおよび黄色フィルターを装着した場合としない場合とでの評価の差を測定した²⁴⁾。しかしフィルター装着での15分間の明順応は若年被験者に対して評価の変化をもたらさなかった。このことは、高齢者のみにおいて、長期の順応効果、あるいは処理のあるレベルにおける加齢効果が起こっていることを示唆している。ただし、

高齢者において増加する迷光(stray light)が彩度を減少させている可能性もある⁵⁾。

そこでKraftとWernerはカラーネーミングによって彩度(色み量/(白み量+色み量))変化を直接測定して若年者と高齢者で比較した。その結果、角膜上での強度が同じ(自然視条件)場合における短波長(420nm)条件においてのみ、彩度が高齢者で減少したものの、他の波長の場合や、網膜上での強度を調整した場合には両者には有意な差が無かった²⁷⁾。しかしその一方で、彼らが被験者別での等輝度条件で純度弁別を行ったところ高齢者の純度弁別能力は若年者に比べて低下した²⁸⁾。さらにSagawaとTakahashiは直接比較法による明るさ視感効率の測定結果から、明るさに対する色みの寄与が高齢者では大きく減少していること(70歳以上では0に近い)から、加齢により色みの信号量が減少していると結論づけている¹⁰⁾。

以上の結果を総合すると、高齢者の色の見えにおいては、彩度の減少が若干ながらもあり、それは色み(信号)の年齢による減少によるものと思われる。

3.2. 明るさ比視感度

色チャンネルに関与する何らかの加齢変化が存在するのであれば、輝度比視感度の場合と異なり明るさの比視感度に対しては、眼光学媒体の変化によるもの以外の加齢による変化があらわれると予想される。そこで、中心窩呈示の1.2度の円形刺激を用いて19から85歳の被験者について併置比較法により明るさ比視感度関数が測定された⁹⁾。明るさ比視感度も平均としてはやはり長波長側で年齢によらず同じ形状であり、短波長側では年齢とともに感度減少が見られた。しかし感度減少量は明らかに輝度比視感度の場合よりも少なかった。輝度比視感度から予測された眼光学媒体濃度により、網膜上の明るさ比視感度を計算した結果、420nmから560nmでは逆に加齢とともに感度の増加が見られた。増加量は波長平均で10年毎に対数値で約0.05であり、これは10歳から70歳の間に標準的な被験者で感度が2倍になることを示している。

SagawaとTakahashiが直接比較法で明るさ比視感度を測定した結果も¹⁰⁾、短波長領域における感度低下を示した。しかし彼らの結果では感度低下は長波長領域にもみられる。これは水晶体の黄変などの眼光学媒体によるものではなく、明るさに対する色みの寄与の強さが、加齢とともに減少することによる

両方に依存して波長は変化しており、各錐体の黄青反対色チャンネルに対する非線形的な入力を示唆している。しかし、被験者間のばらつきが大きいことから、さらに検討が必要である。

SchefrinとWernerがカラーネーミング法により、加齢によるOSA色票の見えの変化を測定した結果²⁴⁾は、青、緑、黄色、赤の色に対する評価は若年（平均21歳）と高齢者（平均72歳）で、ほとんど違わなかった。その一方、高齢者の場合は色み量に対する白み量（無彩色）評価の割合が有為が多く、これは刺激の明度が減少するにつれて明らかに増加した。これは加齢により、色のシフトはほとんど起こらないが、低明度の場合に彩度は低下することを示す。またSagawaとTakahashiが、カラーネーミング法により色カテゴリーの範囲を500 lxで測定した結果²⁵⁾でも、全ての色カテゴリー（赤、藍（紫青）、緑、黄色、青、黄緑、赤紫、灰色）においてValue5のマンセル色票群で示されるカテゴリー範囲は、50名の若年者の示す色カテゴリー範囲よりも、50名の高齢者が示す範囲の方が、特に彩度方向について明らかに小さくなった。これも加齢による彩度の低下、あるいは色の強さの低下を反映していると考えられる。

彩度の減少は、色チャンネルと無彩色チャンネルのバランスの変化によって生じた可能性がある。また、色評価の基準となる白色中性点の加齢による変化も考えられる。水晶体濃度の加齢による変化を考えると、特に短波長光を含む刺激において白色点が大きく変化することが予想されたため中性点の加齢による変化が測定された²⁶⁾。しかし、等輝度(10, 100, 1000 Td)を維持しながら各被験者ごとのユニーク青とユニーク黄色の混色比を変化させることで白色点を求める実験の結果、および600nmの単色光と(被験者平均白色点についての)その補色との混色で白色点を求める結果は、いずれも白色点が年齢により有為には変化しないことを示した(全平均はCIE(x, y)=(0.31, 0.31))。また彩度の差を、老人性縮瞳や水晶体濃度の違いで説明するべく、若年被験者において中性濃度フィルターおよび黄色フィルターを装着した場合としない場合とでの評価の差を測定した²⁴⁾。しかしフィルター装着での15分間の明順応は若年被験者に対して評価の変化をもたらさなかった。このことは、高齢者のみにおいて、長期の順応効果、あるいは処理のあるレベルにおける加齢効果が起こっていることを示唆している。ただし、

高齢者において増加する迷光(stray light)が彩度を減少させている可能性もある⁵⁾。

そこでKraftとWernerはカラーネーミングによって彩度(色み量/(白み量+色み量))変化を直接測定して若年者と高齢者で比較した。その結果、角膜上での強度が同じ(自然視条件)場合における短波長(420nm)条件においてのみ、彩度が高齢者で減少したものの、他の波長の場合や、網膜上での強度を調整した場合には両者には有意な差が無かった²⁷⁾。しかしその一方で、彼らが被験者別での等輝度条件で純度弁別を行ったところ高齢者の純度弁別能力は若年者に比べて低下した²⁸⁾。さらにSagawaとTakahashiは直接比較法による明るさ視感効率の測定結果から、明るさに対する色みの寄与が高齢者では大きく減少していること(70歳以上では0に近い)から、加齢により色みの信号量が減少していると結論づけている¹⁰⁾。

以上の結果を総合すると、高齢者の色の見えにおいては、彩度の減少が若干ながらもあり、それは色み(信号)の年齢による減少によるものと思われる。

3.2. 明るさ比視感度

色チャンネルに関与する何らかの加齢変化が存在するのであれば、輝度比視感度の場合と異なり明るさの比視感度に対しては、眼光学媒体の変化によるもの以外の加齢による変化があらわれると予想される。そこで、中心窩呈示の1.2度の円形刺激を用いて19から85歳の被験者について併置比較法により明るさ比視感度関数が測定された⁹⁾。明るさ比視感度も平均としてはやはり長波長側で年齢によらず同じ形状であり、短波長側では年齢とともに感度減少が見られた。しかし感度減少量は明らかに輝度比視感度の場合よりも少なかった。輝度比視感度から予測された眼光学媒体濃度により、網膜上の明るさ比視感度を計算した結果、420nmから560nmでは逆に加齢とともに感度の増加が見られた。増加量は波長平均で10年毎に対数値で約0.05であり、これは10歳から70歳の間に標準的な被験者で感度が2倍になることを示している。

SagawaとTakahashiが直接比較法で明るさ比視感度を測定した結果も¹⁰⁾、短波長領域における感度低下を示した。しかし彼らの結果では感度低下は長波長領域にもみられる。これは水晶体の黄変などの眼光学媒体によるものではなく、明るさに対する色みの寄与の強さが、加齢とともに減少することによる

と考えられる。これは、彼らが同時にHFP法で測定した輝度比視感度と、明るさ比視感度の差分を取ることによっても確認され、差分によって示される明るさ感の色みによる上昇量は、570nm以上の長波長においては、60歳以上の被験者グループでほとんど見られなかった。このことから単純に考えると、短波長における明るさ比視感度の加齢による減少は、水晶体濃度増加による減少分に、色みの寄与の減少分が加わるため、輝度比視感度の場合よりもずっと大きくなるはずである。ところが、興味深いことに、実際の明るさ比視感度の減少量は、それらの和から予想される減少量よりは、はるかに小さい値を示し、ほぼ輝度比視感度の減少量と同じである¹⁰⁾。しかも色の寄与は短波長領域でも小さいが観察されている¹⁰⁾。

以上の結果は、変化を補正する何らかの神経系での補償作用が存在することを示唆している。ただし、この補償は分光的には完全なものではない。なぜなら、分光眼光学媒体濃度は、どの単一錐体あるいは受容体以降でのさまざまな錐体の組み合わせがもつ分光感度とも異なっているからである。したがってある特定の波長では補償量が多すぎるあるいは逆に少なすぎるということが起こっていると思われる。いずれにせよこの結果は、何らかの受容体以降のメカニズムが、年齢による明るさ比視感度関数の形状変化を補い、明るさ感の維持に寄与していることを示唆している。

3.3. 色弁別実験

前述のように、色の見えは年齢を通じて比較的安定している。それでは色弁別能力の方も安定しているのだろうか？一般的な被験者（若年者）で色覚検査によって色弁別実験を行った場合、低照度条件では色弁別能力が減少することが知られている¹⁴⁾。同じ条件で年齢の効果を調べた場合にも、色の見えの場合と異なり、色弁別能力は明らかに加齢により低下する¹⁴⁾。それゆえに、従来の研究では、水晶体などの眼光学媒体濃度の増加及び瞳孔径の減少によって生じる網膜内での光強度の減少によって、色弁別能力の低下を説明できると言われてきた²⁹⁾。しかしそれらの実験は自然視条件で行われており、網膜までの刺激量変化による影響と、受容体及び受容体以降の神経経路の変化の影響との分離は困難である。

そこで筆者らは、マックスウェル視光学系とHFP測定を利用することによって被験者ごとに分光相対網

膜照度を一定にした条件で実験を行い、網膜上の刺激条件の差（水晶体による光吸収などによる差）によらない色弁別能力の変化について調べた³⁰⁾。2.2節で述べたように、S錐体がかつとも加齢の影響を受けやすいことから、まずS錐体による色弁別能力の加齢による変化を、22-77歳の30人の被験者について測定した³⁰⁾。各被験者のS錐体混同色線上の2つの単色光（片方は420nmに固定）の輝度比を全体の網膜照度（120Td）を一定のまま変化させ、弁別に必要なS錐体刺激量（S-cone Td）の閾値を、そのときのS錐体刺激量の関数として求めた。結果の世代平均として、S錐体刺激量が低いとき、等輝度であるのですなわち黄色領域域での色弁別である、では有意に加齢による弁別閾値上昇が見られた。S錐体刺激強度が上昇するとともに閾値の差は減少し、高S錐体刺激強度の場合、すなわち青領域域では、有意な閾値の差は見られなかった。これは増分閾値の結果³¹⁾と同様である。

さらに他の色について色弁別能の変化を調べるため、Shinomoriらは4人の若年被験者（平均年齢31歳）と4人の老齢被験者（平均73歳）について波長弁別閾値の測定を行った³²⁾。マックスウェル視光学系を用いて、刺激の網膜照度を波長変更中も常に10Tdに保ったまま、2度円形刺激の左右視野に呈示された単色光の波長弁別閾値を測定した。結果は、波長全域の平均では高齢者は若年者に対して約3nm閾値が悪化した。しかし両グループの弁別閾値の差は基準の波長によって変化した。

閾値増加の要因について考えるために、Shinomoriらは、この結果をBoynton-Kambeの色弁別モデル³³⁾の改良版³⁴⁾を用いて解析した^{30,32)}。ノイズ量を加味したウエーバー則関数による閾値予測を基本としたモデルである。このモデルでは、波長弁別は2つの異なるメカニズムで決定され、410~520nmの波長領域ではS錐体のみによるメカニズムで、それ以外の波長領域ではL、M、S錐体が寄与するメカニズムによって弁別が行われていると仮定している。解析により、L、M、S錐体が寄与するメカニズムによる弁別では、ウエーバー則におけるウエーバー係数が増加していることが示された³²⁾。感度自体が低下していることからL、M錐体の信号量低下の影響がそのまま現れていると考えてよい。またS錐体のみによる弁別メカニズムに対しても、前述のS錐体のみによる色弁別結果³⁰⁾に対しても同様に良好なフィッティングが行えた。S錐体の場合は、加齢による感度低下は、

S錐体の光量子吸収量および出力の低下、あるいはS錐体経路における生体(自発自火)ノイズの上昇によるものと考えられた。

これらの結果から、加齢による色弁別能力の低下は、たとえ網膜照度を制御しても生じていることが明らかとなった。加齢による感度低下は、錐体の光量子吸収量および出力の低下、あるいは錐体経路における自発自火ノイズの上昇によるものと考えられた。

どちらの影響が(主)要因であるかについて調べるために、Wernerらは、500nmの円形13度の背景光上で560nmの微少フラッシュ光(直径14.4分で10msec)の検出閾値を測定する方法(Stilesの2色法による π メカニズムの検出と同じ原理)で、検出閾値を測定した³⁵⁾。このとき閾値は(S錐体ではなく)L、M錐体によって決定される。結果は、閾値自体は加齢によって有意に上昇したが、その一方でノイズ量と年齢との相関は全く見られなかった。このことから、錐体信号量の加齢による低下が主原因であると、少なくともL、M錐体による色弁別の場合は考えられる。

応用的な意味で興味深い点は、色弁別閾値の悪化が刺激条件の全域で見られるわけではない点である。これを上記モデルに基づいて解釈すると、もし加齢によって低下した錐体出力を、何らかの受容体以降の経路で増幅しているとすれば、感度自体の低下が補償される代わりにS/N比が悪化するはずであるとの仮説に一致するものである。絶対閾値近辺での感度低下は、単純に刺激が知覚できないことを意味するので、それを補償する方法がなく、絶対閾値は加齢とともに上昇する。一方刺激強度が上昇した場合にはそれを補償することが可能である。さまざまな実験結果は、刺激輝度レベルの低下に伴い、高齢者の視覚機能が若年者と比較して大きく低下することを示している。

3.4. 補償メカニズム

光学媒体濃度の加齢による上昇により、網膜上においては、年齢とともに網膜照度が減少するだけではなく、分光分布も変化して、短波長(青)領域の刺激強度が特に大きく減少する。したがって今まで紹介してきた実験結果は、何らかの神経システムが、色覚を安定させるために色信号の補償や再バランスを行っていることを示唆する。さまざまな色覚研究

の結果に共通するのは、視覚系は生涯にわたり相当程度、色の恒常性を維持することに成功しているということである。

これは、ある程度までは3種類の錐体においてバランスを保ったまま(自然視における)感度が低下することに依存している。これにより、輝度チャンネルに見られるような錐体出力の和や、反対色チャンネルに見られるような錐体出力の差においては、加齢による分光感度の変化が最小限になる。多くの色覚処理は、錐体からの絶対的な信号強度よりも相互の相対強度に依存しており、各錐体の相対感度が加齢にかかわらず維持されるならば、生涯における色恒常性を維持するのは比較的容易となる。そのため、一般視環境(実験室的には角膜上での等価刺激)における色覚は、生涯を通じて比較的安定しているといえる。ただ、このことは特に加齢効果の大きいS錐体の光量子吸収能力の低下による信号量低下は、ある程度まで神経機構によって補償されていることを示唆している。その一方、L、M錐体の信号低下や、迷光の増加などについては神経機構によって補償されている可能性は少ないと思われる。

このような補償メカニズムの一部は、通常の色恒常性で見られるvon Kries型の順応効果である可能性もある。しかし、利得調整や色恒常性メカニズムが生涯を通じて同じように関与しているとは限らない。また、カラーネーミングによる色の見えの実験において、老人性縮瞳や水晶体の老化の効果と同じ効果を中性および黄色フィルターによって若年者に与えても、高齢者の見えをシミュレートすることができなかった点²⁴⁾にも留意する必要がある。これは短期的な色恒常性効果だけでは、加齢による変化の全てを説明できるわけではないことを示すからである。

ただし色弁別の実験ではフィルターの使用¹³⁾や輝度減少¹⁴⁾によって、若年者で、高齢者と同様な結果を作り出すことは可能であった。このことは結果の単純な解釈を難しくしており、色弁別のようにもっぱら低次レベルでの補償機構で説明される加齢効果だけではなく、色の見えのように高次レベルでの神経経路の寄与による補償が予測される加齢効果があることを示唆している。その一方で、厳密な実験条件制御を行えない自然視においては、このような差異による影響は微小であるという事も出来る。

いずれにせよ高齢者の色の見えにはこのような短期あるいは長期的な色恒常性とでも呼ぶべき補償機

構が作用していることが認められる。したがって、加齢による眼光学媒体濃度の増加量から導出された色刺激の色度図上の変化を、そのまま色の見えの変化とする³⁶⁾ことは、色恒常性の効果を全く無視することであり、白色中性点が生涯にわたって安定しているという実験事実から見ても問題がある。

4. おわりに (今出来ること)

結局の所、色覚メカニズムにおける補償機構は、完全ではなく、加齢による影響が現れる。色の見えにおいては(微少ではあるが)彩度の低下であり、色弁別においては、感度低下による弁別閾値の上昇などである。これらの現象は低網膜照度あるいは低色チャンネル出力時(色みが弱い時)に顕著である。そこで、応用的な観点から考えれば、高齢者にとって快適な視環境のためには、以下のような配慮が有効であると考えられる。

(1) 必要十分な照度の維持

照明環境の照度を高めに維持することは、網膜上の対象(刺激)の強度を維持し、錐体出力信号の減少を補償することになる。ただし、不快グレア(もちろん減能グレアも)の発生する照度は、加齢とともに減少することにも配慮する必要がある。従って適正な照度の幅(下限値と上限値の差)は年齢とともに狭くなることになる。目的に応じた適正な照度のある環境を構築することが望まれる。

(2) 刺激の十分な色差の維持と刺激色に対する配慮

反対色処理メカニズムに用いられる各錐体の信号が加齢により減少することから、いわゆる色チャンネルの信号強度も加齢により減少する。色信号が、生体ノイズと比べてそれほど大きくないレベルまで減少すると、色弁別能力は悪化してしまう。従って、色差がそれほど大きくない場合には、高齢者にとって色の見分け(色弁別)が苦しくなる。そのため、サインなどでは、十分な色差を維持するようにしないといけない。

また、水晶体の黄変により、特に短波長光がより大きく減衰されるため、青系の色コントラストが若年者より大きく減少する点には注意が必要である。前章で、青が強ければS錐体刺激量が大きくなるので、色弁別にあまり影響しない、と述べたのは、刺激を高齢者において高照度にして、水晶体の黄変などを

補完した実験室環境における結果であることを思い出して頂きたい。現実の視環境では、水晶体の黄変の影響が大きく寄与するのである。

また配色においては、彩度が減少して色の見えが白っぽくなる点と、それにより色カテゴリー範囲が特に彩度方向で減少することに留意する必要がある。また特に、S錐体混同色線上に乗るような白-黄色方向の色変化においては、水晶体の黄変の影響による中性点の(微少な)移動の影響も受けやすく、ますます色の区別(弁別)が難しくなる点にも配慮しておく必要がある。

この観点から、演色性が低い照明光を用いることは、錐体出力信号の差分である色信号の低下を意味するので、高齢者において特に色情報の利用を妨げる結果になる。そのため、十分注意する必要がある。

幸いなことに、以上2つの点において、高齢者に配慮された環境は、若年者にとっても快適な環境である。つまり全ての年齢層に対して望ましい方向である。それ以上の改善、例えば分光的に短波長がより高照度であるような照明を用いること、を行うには、現時点での加齢効果に対する研究はまだ十分とはいえず、基礎的にも応用的にも深い議論を行うためのデータが不足している状況である³⁷⁾。視環境デザインのみならず、今後の情報処理分野などにおける応用も含めて、幅広い視点からの加齢効果の心理物理学的研究の推進が求められている。

謝辞

本稿で取り上げた筆者の研究の多くは、コロラド大学・カリフォルニア大学のワーナー教授との共同研究によるものであり、全米保健機構のNational Institute on Aging (AG04058)より研究費助成を受けた。また本稿作成にあたって、科学研究費(基盤研究(C)15500147)およびハイテクリサーチセンター補助金(高知工科大学)を受けた。

文献

- 1) M. A. Johnson and D. Choy: On the definition of age-related norms for visual function testing, *Appl. Opt.*, 26 (1987) 1449-1454.
- 2) 小田浩一、西村つむぎ: ロービジョンの読書特性を自動計測するpcMNREAD-J, *信学技報*, WIT2002-61 (2002-12).

- 3) J. S. Werner and L. Spillmann: UV-absorbing intraocular lenses: safety, efficacy, and consequences for the cataract patient, *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 227 (1989) 248-256.
- 4) R. A. Weale: Retinal senescence, *Progress in Retinal Research* (N. Osborne & J. Chader (Eds.)) (pp. 53-73), New York: Pergamon Press (1986).
- 5) J. S. Werner: Visual problems of the retina during ageing: Compensation mechanisms and colour constancy across the life span, *Progress in Retinal and Eye Research*, 15 (1996) 621-645.
- 6) L. Freeney-Burns, E.S. Hilderbr and S. Eldridge: Aging human RPE: morphometric analysis of macular, equatorial, and peripheral cells, *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 25 (1984) 195-200.
- 7) R. A. Weale : Notes on the photometric significance of the human crystalline lens, *Vision Res.*, 1 (1961) 183-191.
- 8) K. H. Ruddock : The effect of age upon colour vision-I. Response in the receptor system of the human eye, *Vision Res.*, 5 (1965) 37-45.
- 9) J. M. Kraft and J. S. Werner : Spectral efficiency across the life span: flicker photometry and brightness matching, *J. Opt. Soc. Am. A*, 11 (1994) 1213-1221.
- 10) K. Sagawa and Y. Takahashi: Spectral luminous efficiency as a function of age, *J. Opt. Soc. Am. A*, 18 (2001) 2659-2667.
- 11) W. S. Stiles and J. M. Burch : N.P.L colour-matching investigation: final report (1958), *Optica Acta*, 6 (1959) 1-26.
- 12) R. Lakowski : Is the deterioration of colour discrimination with age due to lens or retinal changes?, *Farbe (Die Farbe)*, 11 (1962) 69-86.
- 13) G. Verriest : Further studies on acquired deficiency of color discrimination, *J. Opt. Soc. Am.*, 53 (1963) 185-195.
- 14) K. Knoblauch, F. Saunders, M. Kusuda, R. Hynes, M. Podgor, K. E. Higgins and F. M. de Monasterio : Age and illuminance effects in the Farnsworth-Munsell 100-hue test, *Appl. Opt.*, 26 (1987) 1441-1448.
- 15) CIE Publication 146 TC1-50 report: CIE equations for disability glare (2002).
- 16) C. A. Curcio, C. L. Millican, K. A. Allen and R. E. Kalina : Aging of the human photoreceptor mosaic: evidence for selective vulnerability of rods in central retina, *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 34 (1993) 3278-3296.
- 17) J. Marshall: Ageing changes in human cones, XXIII Concilium Ophthalmologicum, Kyoto, 1978 (K. Shimizu & J. A. Oosterhuis (Eds.)) (pp. 375-378), Elsevier North-Holland (1978).
- 18) J. S. Werner and V. G. Steele : Sensitivity of human foveal color mechanisms throughout the life span, *J. Opt. Soc. Am. A*, 5 (1988) 2122-2130.
- 19) W. T. Ham Jr, H. A. Mueller, J. J. Ruffolo Jr, D. Guerry III and R. K. Guerry : Action spectrum for retinal injury from near-ultraviolet radiation in the aphakic monkey, *Am. J. Ophthalmol.*, 93 (1982) 299-306.
- 20) J. S. Werner, V. G. Steele and D. S. Pfoff : Loss of human photoreceptor sensitivity associated with chronic exposure to ultraviolet radiation, *Ophthalmol.*, 96 (1989) 1552-1558.
- 21) C. A. Curcio and D. N. Drucker : Retinal ganglion cells in Alzheimer's disease and aging, *Ann. Neurol.*, 33 (1993) 248-257.
- 22) B. E. Scheffrin, M. L. Bieber, R. McLean and J. S. Werner: The area of complete scotopic spatial summation enlarges with age, *J. Opt. Soc. Am. A*, 15 (1998) 340-348.
- 23) B. E. Scheffrin and J. S. Werner : Loci of spectral unique hues throughout the life span, *J. Opt. Soc. Am. A*, 7 (1990) 305-311.
- 24) B. E. Scheffrin and J. S. Werner : Age-related changes in the color appearance of broadband surfaces, *Color Res. and Appl.*, 18 (1993) 380-389.
- 25) K. Sagawa and Y. Takahashi: Span of categorical colors measured by similarity of colors, *Proc. 25th Session of the CIE*, Vol.1 (2003) pp. D1-64~D1-67.
- 26) J. S. Werner and B. E. Scheffrin : Loci of achromatic points throughout the life span, *J. Opt. Soc. Am. A*, 10 (1993) 1509-1516.
- 27) J. M. Kraft and J. S. Werner: Aging and the saturation of colors. 2. Scaling of color appearance, *J. Opt. Soc. Am. A*, 16 (1999)

- 231-235.
- 28) J. M. Kraft and J. S. Werner: Aging and the saturation of colors. 1. Colorimetric purity discrimination, *J. Opt. Soc. Am. A*, 16 (1999) 223-230.
- 29) J. D. Moreland: Matching range and age in a blue-green equation, *Colour Vision Deficiencies Vol. XI* (B. Drum (Ed.)) (pp. 129-134), Kluwer Academic Publishers (1993).
- 30) B. E. Scheffrin, K. Shinomori and J. S. Werner : Contributions of neural pathways to age-related losses in chromatic discrimination, *J. Opt. Soc. Am. A*, 12 (1995) 1233-1241.
- 31) B. E. Scheffrin, J. S. Werner, M. Plach, N. Utlaut and E. Switkes : Sites of age-related sensitivity loss in a short-wave cone pathway, *J. Opt. Soc. Am. A*, 9 (1992) 355-363.
- 32) K. Shinomori, B. E. Scheffrin and J. S. Werner: Age-related changes in wavelength discrimination, *J. Opt. Soc. Am. A*, 18 (2001) 310-318.
- 33) R. M. Boynton and N. Kambe : Chromatic difference steps of moderate size measured along theoretically critical axes, *Color Res. and Appl.*, 5 (1980) 13-23.
- 34) K. Shinomori, B. E. Scheffrin and J. S. Werner : Spectral mechanisms of spatially induced blackness: Data and quantitative model, *J. Opt. Soc. Am. A*, 14 (1997) 372-387.
- 35) J. S. Werner, K. A. Schelble and M. L. Bieber: Age-related increases in photopic increment thresholds are not due to an elevation in intrinsic noise, *Color Res. and Appl.*, 26 (2001) S48-S51.
- 36) C. A. Yoshida and S. Sakuraba : The use of films to simulate age-related declines in yellow vision, *J. Occupational Rehabilitation*, 6 (1996) 119-134.
- 37) K. Shinomori: Senescent changes in color discrimination and color appearance, *J. Illumi. Eng. Inst. Jp.* (照明学会英文誌), 24 (2000) 40-44.