

## 論文

# 輝度コントラストの加齢変化に基づく高齢者の色視認性評価法 ～計算シミュレーションと高齢者水晶体擬似フィルタ～

## Test Methods of Color Visibility for Old People Based on Age-Related Change of Luminance Contrast -Computer Simulation and Artificial Filters to Simulate Aged Human Lenses-

|       |                   |            |                          |
|-------|-------------------|------------|--------------------------|
| 岡嶋 克典 | Katsunori Okajima | 防衛大学校      | National Defense Academy |
| 吉田 博  | Hiroshi Yoshida   | ジオマテック株式会社 | Geomatec Co., Ltd.       |
| 氏原 彰  | Akira Ujihara     | //         | Geomatec Co., Ltd.       |

## Abstract

Luminance contrast is a critical factor in visibility of coloring patterns. However, it is indicated that the luminance sensitivity function of old people is modified by the age-related change of ocular transmittance. Therefore, it suggests that the coloring design with high visibility for young people may not provide good result for old people. To estimate the visibility of coloring for old people quantitatively based on luminance contrast, we calculated the values of effective luminance and effective lightness of lights reflected from Munsell color chips on the retina as a function of age. The results show that the effective luminance values of bluish chips relatively decrease much more than those of other color chips as age increases, and that the effective lightness values of reddish chips become higher values than other color chips as age increases. In addition, we produced the artificial filters for young subjects to simulate aged human lens as an estimation tool of visibility of coloring for old people. Both of the computer simulation and the artificial filter simulation in the present paper must be useful when young designers check the visibility of color designs for old people they made.

## 要 旨

色パターンの視認性において、輝度コントラストは重要な要因の1つであるが、高齢者の輝度感度関数は眼光学系の加齢変化によって若年者と異なっていることが指摘されている。したがって、若年者で高い視認性を与える配色デザインが、高齢者により結果を与えない可能性があることが示唆される。本研究では、輝度コントラストに基づく高齢者の色の視認性を定量的に評価するために、網膜上のマンセル色票からの反射光の実効輝度と実効明度の値を年齢の関数として計算した。その結果、年齢が高くなるほど青系統の色票の実効輝度値は相対的に他の色票に比べて減少すること、ならびに年齢が高くなるほど赤系統の実効明度が他の色票よりも高くなることが示された。さらに、高齢者の色の視認性を評価するツールとして、高齢者の水晶体を若年者においてシミュレートできる人工的なフィルタを実際に作製した。計算シミュレーションと人工フィルタによるシミュレーションは共に、若いデザイナーが高齢者のための配色デザインの視認性を自分自身で検査できることから、有効な方法であると考えられる。

## 1. はじめに

「高齢社会」と呼ばれる現在において、増え続ける高齢者に適した色彩環境を提供することは、単なる快適性だけの問題ではなく、高齢者が日常生活を安全に暮らすためにも重要なことであると考えられる。ところで、実際に色彩環境を設計するのは高齢者ではなく、比較的若い人が行なうことが多い。視覚特性は加齢とともに生理学的にも心理学的にも変化するため、若年者にとって快適で見やすい色彩環境が、高齢者にもそうであるとは限らない。そこで、若いデザイナーが設計した色彩デザインが、高齢者にとって見やすいのかどうかを、若い人が直接確かめられる方法論やツールが求められている。

高齢者のための色彩設計を検討する際、色の見えの特性を「色の弁別能」、「色の同定特性」、「色の嗜好性」そして「色の視認性」の4つに分けて考える必要があると考えられる。「色の弁別能」とは、細かい色の違いを区別する能力のことである。Knoblauchらは、照度レベルを変えて、各年代の被験者で100ヒューテストを行なったところ、年齢が高いほど色弁別能は低下し、特に照度が低い場合に顕著な劣化が見られることを明らかにしている<sup>1)</sup>。一方、「色の同定特性」とは、その色の見えがどのように知覚・認識されているのかを示す特性であり、例えば青色や赤色といった色名で表わすことができる。Schefflinらは、若干の彩度低下は認められるものの、水晶体の黄変化にもかかわらず、高齢者も若年者とほぼ同じ色相を知覚していることを実験的に示している<sup>2)</sup>。したがって、視覚の色覚メカニズムにおいて、加齢による水晶体の分光特性変化を打ち消す何らかの補償作用が、神経レベルにおいて存在していると考えられている<sup>3-5)</sup>。また、「色の嗜好性」とは、その色が好きなのか嫌いなのかといった、色の感性的な特性に関する傾向であるが、これが年齢とともにどのように異なるかは今のところはっきり分かっていない。最後の「色の視認性」であるが、これには色自体の影響とコントラストによる影響とがあり、コントラストにも色コントラストと輝度コントラストが関係する。「色の同定特性」の加齢による違いは少ないことから、色自体の視認性や色コントラストについては高齢者と若年者で大きな違いはないものと思われる。一方、高齢者の輝度の分光感度は若年者に比べて相対的に短波長ほど低下することが知られている<sup>6)</sup>。したがって、輝度コントラストについては、高齢者と若年者で大きく異なり、若年者で見やすい配

色が高齢者で見えにくい場合があり得る。例えば、高齢者は暗い背景での青文字が見にくいと感じる傾向があるとされているが、これは青い文字の輝度が高齢者の場合、若年者よりも実質小さくなり（これを実効輝度とよぶ）、背景との輝度差が減少し、輝度コントラストが小さくなるためであると考えられる。

Wernerら<sup>6)</sup> や栗木ら<sup>7)</sup> は、高齢者の若年者に対する輝度の分光感度の低下が、眼の光学系、主に水晶体の加齢変化で説明できることを実験的に示している。したがって、水晶体の加齢変化を定量的に考慮することで、高齢者の輝度コントラストに基づく色の視認性の評価を行なうことが可能であると考えられる。

そこで本研究では、これまでに定式化されている水晶体の加齢モデルを用いて、計算シミュレーションによって色票の違いによる高齢者の実効輝度ならびに実効明度の違いを検討し、配色の際に留意すべき点について定量的に考察した。また、高齢者の水晶体を若年者で分光的に正しくシミュレートできる高齢者水晶体擬似フィルタを作製し、そのフィルタを用いた輝度コントラストに基づく高齢者の色の視認性評価の有効性についても考察した。

## 2. 水晶体加齢モデルに基づく実効輝度と実効明度の計算シミュレーション

水晶体加齢モデルには、PokornyらのTwo-Factorモデルを採用した<sup>8) 9)</sup>。モデルの詳細や他のモデルとの比較については参考文献<sup>10)</sup>を参照されたい。水晶体の光透過特性は光学濃度で表されることが多いが、照明光の分光計算や光の透過特性を見るためには分光透過率が重要となる。 $\lambda$ を波長とし、ある年齢Aの光学

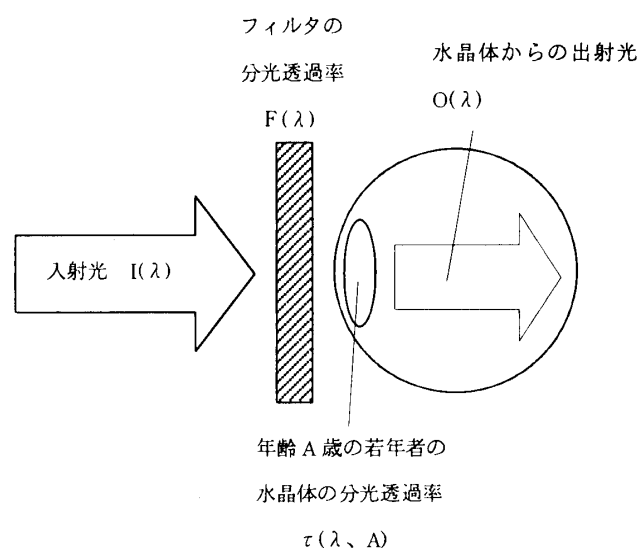


図1 擬似フィルタの設計原理

濃度  $D(\lambda, A)$  を有する水晶体への入射光分光強度を  $I(\lambda)$ 、その出射光分光強度を  $O(\lambda)$  とすると、

$$D(\lambda, A) = \log_{10}(I(\lambda)/O(\lambda)) \quad \cdots (1)$$

の関係が成立するから、水晶体の分光透過率  $\tau(\lambda, A)$  ( $=O(\lambda)/I(\lambda)$ ) は

$$\tau(\lambda, A) = 10^{-D(\lambda, A)} \quad \cdots (2)$$

で関係づけられる。

若年者 (年齢  $A_1$ ) があるフィルターを通して見ることによって、高齢者 (年齢  $A_2$ ) の人と等価な分光透過率をシミュレートすることができる。そのフィルターの分光透過率  $F(\lambda, A_2, A_1)$  は、

$$F(\lambda, A_2, A_1) = \tau(\lambda, A_2) / \tau(\lambda, A_1) \quad \cdots (3)$$

で求めることができる (図1)。

現在の測光・測色学は、標準観測者の等色関数を想定して体系づけられており、その基になった測定データは数多くの被験者から得られたものであるが、全被験者の年齢分布は明らかにされていない。しかし、加齢によって水晶体の分光透過率が変化した場合の網膜に到達する実効的な光の測色値を計算するためには、測色学の基準となる年齢 (標準観測者の年齢) を仮定しておく必要がある。そこで、StilesとBurchの等色実験に参加した被験者の平均年齢が32歳であること<sup>1)</sup>から、ここでは標準観測者の年齢を32歳と仮定する。したがって、CIEの等色関数を用いて計算した測色値は、32歳の被験者にとってはそのまま適用できるが、それ以外の被験者の場合は32歳の人 (3) 式で求めた適当なフィルターを通して見る光の測色値に換算する。ここでは、網膜に実際に到達する (32歳に対する) 等価輝度を、「実効輝度」と呼ぶことにする。例えば、年齢  $A$  の人の眼に分光エネルギー  $E(\lambda)$  の照明光が入射した場合、網膜に到達する実効輝度  $L(A)$  を

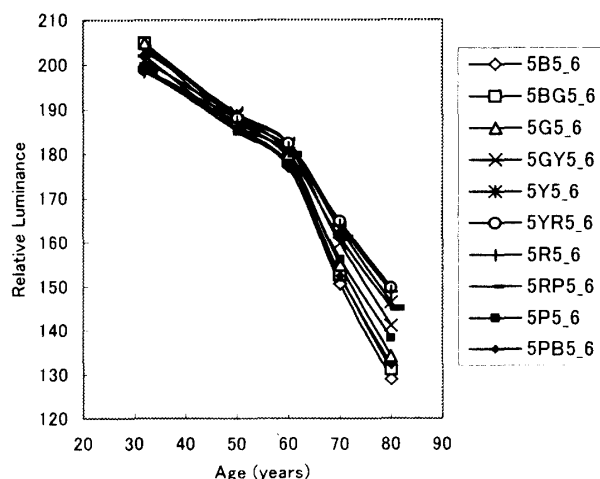


図2 水晶体加齢効果による各色票の実効輝度の変化

$$L(A) = K \sum_{400}^{650} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) F(\lambda, A, 32) \Delta \lambda \quad \cdots (4)$$

と定義する。ここで、 $K$ は最大視感度定数、 $\bar{y}(\lambda)$ は等色関数である。また、今回は  $\Delta \lambda$  を10(nm)ステップで計算した。 $A=32$  (歳) の場合は  $F(\lambda, 32, 32) \equiv 1$  となり、 $L(32)$  は輝度  $L$  と等しい。 $A_2$  歳の人 (人) は  $A_1$  歳の人 (人) に比べて ( $A_1 < A_2$  の場合)、物理的に同じ照明光でも、網膜に到達する実効輝度は

$$L(A_2)/L(A_1) \quad \cdots (5)$$

倍となる。これを「実効輝度比」と定義する。また、分光反射率  $\rho(\lambda)$  をもつ物体の反射光の実効輝度  $Y(A)$  を同様に

$$Y(A) = K \sum_{400}^{650} \rho(\lambda) E(\lambda) \bar{y}(\lambda) F(\lambda, A, 32) \Delta \lambda \quad \cdots (6)$$

と定義する。

$A=32$  (歳) の時、以上の測色値は通常の測色値と等しくなり、それ以外の年齢の時 (32歳の人) の網膜上での換算値を与える。実際にD65照明下でのマンセル色票の加齢による実効輝度の変化を計算した例を以下に示す。シミュレーションに使用したマンセル色票は、バリュー5でクロマ6のヒュー5で始まる5B5/6、5BG5/6、5G5/6、5GY5/6、5Y5/6、5YR5/6、5R5/6、5RP5/6、5P5/6、5PB5/6の10枚である。図2にその計算結果を示す。これを見ると、どの色票も年齢と共に実効輝度が低下すること、青系の色票は赤系の色票に比べてその実効輝度の減少率が大きいことが分かる。配色を考える場合、輝度の絶対値も重要であるが、相対的な輝度関係がパターンの境界 (エッジ) を見るために最も重要であると考えられる。そこで、その相対的な輝度関係が加齢とともにどのように変化するのかを分かりやすく見るために、次式 (7) のCIELAB均等色空間への変換式を用いて、

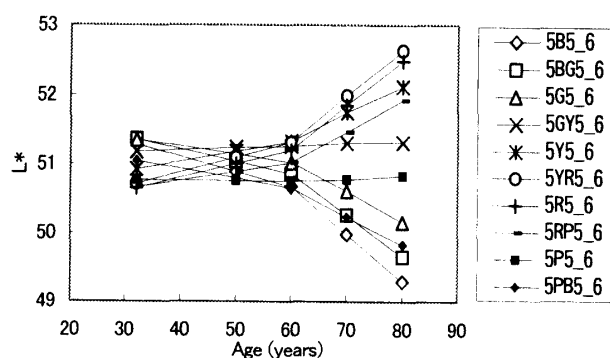


図3 水晶体加齢効果による各色票の実効明度の変化

年齢 $A$ (歳)の実効明度 $L^*(A)$ を計算した。ここで、 $Y_0(A)$ は $A$ (歳)での完全反射白色面の実効輝度である。

$$L^*(A) = 116 \left( \frac{Y(A)}{Y_0(A)} \right)^{1/3} - 16 \quad \dots (7)$$

計算結果を図3に示す。これを見ると、60歳までは実効明度の変化は小さく、色票の違いもほとんど見られないが、60歳以降で色票による違いが大きく生じることが分かる。赤系の色票は、グレイや青系の色票に比べて相対的に「明るく」なり、逆に青系の色票は相対的に「暗く」なることを示している。したがって、明るい青地に暗い赤の配色や、黒やグレーの地に青の配色は、高齢者にとって輝度差(明度差)が小さくなるため、境界(エッジ)が見えにくく、結果的に色も見えにくくなり、文字やパターンが読み取りにくくなる恐れがあることを示している。

ところで、これまでの高齢者の色覚特性に関する研究結果から、以下のようなことが分かっている。

- 1 照度(輝度)が低下すると色弁別能は大幅に低下する。特に黄色青色の色弁別能が低下する<sup>1)</sup>。
- 2 色弁別能低下は、年齢に伴い、高い照度(輝度)で生じるようになる<sup>1)</sup>。
- 3 高齢者は、若年者よりも彩度を低く評価する、すなわち「白っぽく」見ている可能性がある<sup>2)</sup>。
- 4 色弁別能低下も彩度低下も、眼光学系だけではなく、錐体and/or神経系の加齢変化が原因<sup>2) 7)</sup>。
- 5 色認識レベルにおいては、高齢者も若年者と大きな違いは見られない<sup>2) 12)</sup>。

したがって、今回の計算シミュレーションの結果も考慮すると、高齢者のための配色を考える際に注意すべきこととして、

- 1 色情報が重要となる環境の場合、ある照度以下

は用いないようにし、できるだけ高照度にする。

- 2 低い照度にする場合は、色情報以外の情報(文字等)を付加する。
- 3 高齢者の網膜輝度の変化は、色によって異なるため、輝度差にも注意して配色する。例えば、青色は赤色に比べて実効輝度の低下が大きいいため、「青以外の暗い背景上の明るい青地」の隣接関係の場合に注意する必要がある。
- 4 用いる色はできるだけ高彩度かつ高明度にした方が、低照度での彩度低下の影響が小さい。
- 5 波長に対する相対的明るさが補償されている可能性もあるが、絶対的明るさは低下していることに注意する必要がある。(眼光学系の加齢効果から推定される網膜照度低下による明るさの減少を考慮する必要がある)

等があげられる。

以上に述べてきたような計算シミュレーションを行なうことによって、ある配色パターンが高齢者に見えやすいのか否かを定量的に予測し、評価することができる。すなわち、配色パターンの分光反射率データ、ならびに照明光の分光分布データさえあれば、高齢者のための配色デザインの妥当性を数値的に検討することが可能となる。しかし、計算しなければならない色の数が多い場合に、計算シミュレーションは面倒であり、また分光測色器も必要である等、誰にでも簡単に行なえる方法とはいえない。そこで、これと同様な評価を視感的に一瞬で行なう方法として、高齢者水晶体擬似フィルタを用いたシミュレーションがある。

### 3. 水晶体加齢モデルに基づく擬似フィルタの作製とその有効性

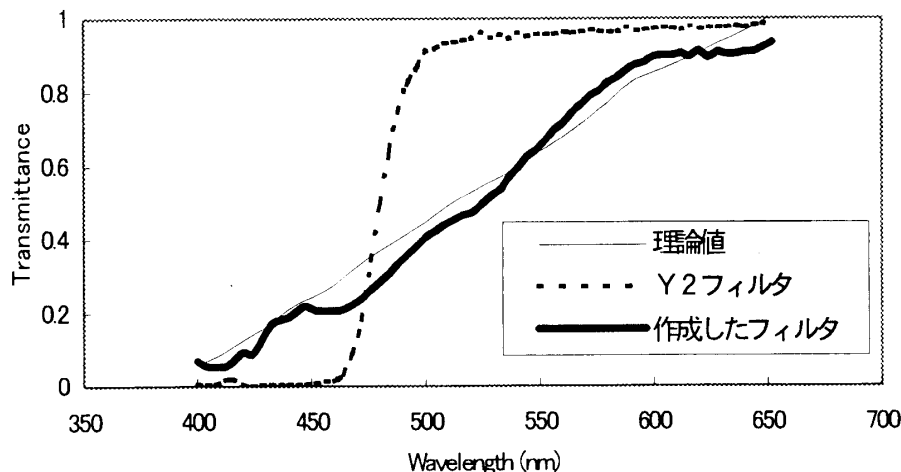


図4 水晶体擬似フィルタの分光透過率特性

若年者にある色フィルタをかけさせて、高齢者と同じ水晶体の状態を模擬する試みは既に行われている<sup>13) 14)</sup>が、例えば20歳の人と80歳の人と同じ水晶体の透過率をシミュレートするためには、理論的に(3)式を満たす色フィルタが必要になることに留意する必要がある。実際、この計算から求めた20歳用80歳シミュレーション用フィルタの分光透過率は、図4の細線のようにになる。これを見ると、短波長になる程、分光透過率が減少する特性を呈しているが、高齢者シミュレーションの際に時々用いられているカメラ用Y2フィルタのような透過特性(図4点線)とは大きく異なる。もし、このフィルタを高齢者の水晶体シミュレーションに用いた場合、450nm以下の光は眼に到達しないため、短波長を多く含む青い光は完全に黒くなってしまう。また、中波長領域の理論値よりもはるかに高い透過率特性によって、過大に「黄色化」を強調することは測色学的に明らかであり、シミュレーションとして不合理である。

図4の細線で示すような理論値に近い分光透過率特性をもつ既製品フィルタは今のところ存在しないようである。そこで今回、我々はこの理論値を基にしたフィルタの作製を試みた。一般的なフィルタは、色ガラスか、屈折率が異なる光学薄膜の膜厚を周期的に繰り返して積層させた光学多層膜を使用している。しかし、1枚の色ガラスで理論値に近い分光透過率をもつようなフィルタの作製は技術的にもコスト的にも困難であり、また光学薄膜の膜厚を周期的に繰り返して積層させた光学多層膜の透過特性は、カメラ用Y2フィルタのように急峻な傾斜(図4点線)を有してしまう。そこで理論値のようななだらかな傾斜を有する分光透過率特性を実現するために、光学薄膜の膜厚を周期的な繰り返しがないように積層する方法を考案し、試作を重ねた。そしてTiO<sub>2</sub>(屈折率2.25)およびSiO<sub>2</sub>(屈折

率1.46)薄膜を光学ガラス(BK-7)基板上に交互に16層積層させた光学多層膜(図5)を利用することにより、かなり精度の高いフィルタを作製できた(図4太線)。なお、この光学多層膜は真空蒸着法により作製した。

数値分析の結果、出来上がった試作フィルタは20歳用80歳フィルタとして用いると、理論値の適用範囲内で最も精度が高くなることが分かった。(注：今回使用した水晶体加齢モデルの適用年齢は20～80歳までである。また、便宜上このフィルタを「80/20フィルタ」と以下呼ぶことにする。)理論値と実際の分光透過率の間には多少の誤差や個体差が存在するが、その平均誤差は、D65白色光に対してxy色度でコンマ3桁め、輝度で2%以下にすぎず、実際の個人差や加齢モデル間の違いに比べて、この誤差は無視できるレベルである。したがって、単色光等のシャープな分光特性の光を観察する場合を除けば、通常の照明光と物体色(ブロードな分光特性の場合)の環境においては、高齢者水晶体擬似フィルタとして問題なく使用できる。この80/20フィルタを通して若年者が色パターンを観察することにより、先程の計算シミュレーションで得られる結果を、実際に眼で確認する方法で簡単に評価できる。したがって、色彩デザインの応用現場において、色の視認性を評価するツールとして有効性が高いと考えられる。ただし、強調しておきたいことは、このフィルタはあくまでも高齢者の輝度コントラストに基づく視認性を評価するためのものであり、高齢者の色の見えそのものをシミュレートしているわけではないことに注意されたい。

また、同様な方法で、20歳の被験者に対して70歳の水晶体を模擬できるフィルタ(以下、「70/20フィルタ」とする)も作製した。このフィルタの場合、今回使用した水晶体加齢モデルの適用年齢は20～

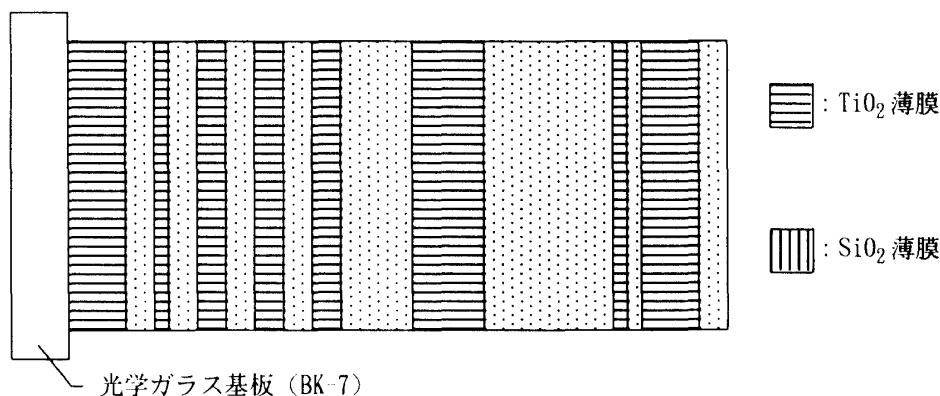


図5 光学多層膜の構成

80歳までであるため、20歳以上でも適用可能であり、例えば30歳で73歳相当、37歳で75歳相当、45歳で77歳相当のフィルタとして使用することができる。また、実際に商品を購入し、頻繁に使用する高齢者の平均年齢は70歳前後と予想されることから、応用現場における需要としては、この70/20フィルタの方が有効性が高いと考えられる。

今回は瞳孔径の加齢変化（老人性縮瞳）を考慮していない<sup>15)</sup>が、どの色に対しても同様に実効輝度を減少させることから、輝度コントラストの評価に関しては問題ない。しかし、低い輝度（照度）の場合、老人性縮瞳による絶対的明るさ低下に伴う色の見えや視認性の変化も考慮することで、さらに精度の高いシミュレーションを行なうことも可能であると考えられる<sup>16)</sup>。

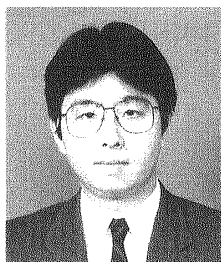
#### 4. 結論

水晶体加齢モデルを用いて、輝度コントラストに基づく高齢者の色の視認性を、計算シミュレーションによって検討する手法を提案した。また、理論的に根拠のある高齢者の水晶体擬似フィルタを設計し、実際に作製した。今後は、高齢者の色の見えや弁別能等の他の色覚特性についても、詳細に検討していきたいと考えている。

#### 参考文献

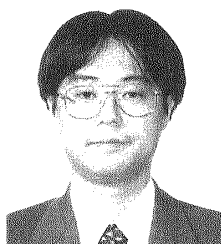
- 1) K. Knoblauch, F. Saunders, M. Kusuda, R. Hynes, M. Podgor, K. E. Higgins and F.M.de Monasterio: Age and Illuminance Effects in the Farnsworth-Munsell 100-Hue Test, *Applied Optics*, 26-8 (1987) 1441-1448
- 2) B. E. Schefrin and J. S. Werner: Age-Related Changes in the Color Appearance of Broadband Surfaces, *Color Res. Appl.* 18-6 (1993) 380-389
- 3) 篠森敬三：高齢化と色の見え～加齢による色覚の変化～、カラーフォーラムJAPAN講演論文集 (1997) 89-96
- 4) 岡嶋克典、山下亮、高瀬正典：色覚の年齢変化～水晶体加齢効果シミュレーションと色順応実験～、*日本色彩学会誌*、22、Suppl. (1998) 16-17
- 5) 岡嶋克典：高齢化の色の見えと照明効率、カラーフォーラムJAPAN講演論文集 (1998) 37-44
- 6) J. S. Werner and V. G. Steele: Sensitivity of Human Foveal Color Mechanisms Throughout the Life Span, *J. Opt. Soc. Am.*, A-12 (1988) 2122-2130
- 7) 栗木一郎、石井渉、内川恵二：加齢による水晶体黄変が色覚におよぼす影響、*照明学会誌*、84-2 (2000) 107-116
- 8) J. Pokorny, V. C. Smith and M. Lutze: Aging of the Human Lens, *Applied Optics*, 26 (1987) 1437-1440
- 9) J. Xu, J. Pokorny and V. C. Smith: Optical Density of the Human Lens, *J. Opt. Soc. Am.*, A-14 (1997) 953-960
- 10) 岡嶋克典、岩田三千子：水晶体加齢モデルによる高齢者の照明シミュレーションと最適照度の検討、*照明学会誌* 82-8A (1998) 564-572
- 11) W. S. Stiles and J. M. Burch: Interim Report to the CIE, Zurich, 1955, on the National Physical Laboratory's Investigation of Colour-Matching, *Opt. Acta*, 2 (1955) 168-181
- 12) J. S. Werner and B. E. Schefrin: Loci Achromatic Points throughout the Life Span, *J. Opt. Soc. Am.*, A-10 (1993) 1509-1516
- 13) 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
- 14) 吉田あこ、桜庭晶子：高齢者の色覚～視界黄変化の実態とシミュレーション～、カラーフォーラムJAPAN講演論文集 (1996) 79-86
- 15) B. Winn, D. Whitaker, D. B. Elliott and N. J. Phillips: Factors Affecting Light-Adapted Pupil Size in Normal Human Subjects, *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 35 (1994) 1132-1137
- 16) 岡嶋克典：水晶体と瞳孔の年齢変化から導出した高齢者の等価照度換算式、*照明学会誌*、83-8A (1999) 556-560  
(受付日：2000年4月27日)

## 著者紹介



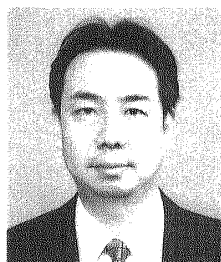
岡嶋克典（おかじまかつのり）

昭和37年9月17日生。平成2年東京工業大学大学院物理情報工学専攻博士課程修了。工学博士。現在、防衛大学校助教授。日本色彩学会、照明学会、日本視覚学会、日本光学会、映像情報メディア学会等に所属。



吉田博（よしだひろし）

昭和36年11月11日生。昭和60年横浜市立大学文理学部理科物理学課程修了。現在、ジオマテック株式会社開発室に勤務。日本色彩学会、日本物理学会、応用物理学会等に所属。



氏原彰（うじはらあきら）

昭和37年1月3日生。昭和61年日本大学文理学部物理学科修了。現在、ジオマテック株式会社開発室に勤務。