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

正会員 岡 嶋 克 典 (防衛大学校)

正会員 岩 田 三 千 子 (摂南大学)

Simulation of Light Efficiency for Aged People and Data-Analysis of an Optimal Illuminance with Aging Models of the Human Lens

Member Katsunori Okajima (National Defense Academy)

and Member Michiko Iwata (Setsunan University)

ABSTRACT

We derived ocular spectral transmittances as a function of age with aging models of the human lens and calculated the age-related change in retinal illuminance of D65, D50, and A-lights. The results show that the retinal illuminance of A-light for a 70-year-old person decreases to approximately 0.75 times that for a 22-year-old, and that the magnification factor in the case of D65-light is as low as 0.72. In addition, we conducted an experiment to measure the optimal illuminance for reading a newspaper under two kinds of fluorescent lamp condition (daylight and incandescence colors) for young and aged subjects. The results indicate that aged subjects needed higher illuminance for the reading task than young subjects. We demonstrate that the analysis with aging models of the human lens can explain the tendency of the difference between young and aged subjects in the experimental results. We believe that our approach in the present study will be useful for making a practical standard concerning comfortable illumination environment for aged people.

KEYWORDS : aging, transmittance of human lens, retinal illuminance, simulation of aging vision, optimal illuminance, reading task

1. はじめに

高齢者人口が急激に増加しつつある現在、照明環境も高齢者の特性を考慮した基準作りがこれまで以上に重要になってきている。照明は外界の視覚情報を取り入れるための物理的情報源であることから、照明環境の向上は高齢者の生活におけるあらゆる場面で大きな効果をもたらすものと考えられる。高齢者に優しい照明を実現するためには、高齢者の視覚特性、すなわち視覚の加齢現象を明らかにし、その特性を踏まえた光環境を工学的に設計できるように、具体的な数値やモデルを確立する必要がある。高齢者の照明基準を検討する上で考慮すべき視覚の加齢効果の1つに、水晶体の加齢変化がある。加齢に伴う水晶体の濃度増加によって透過率が減少し、網膜に到達する光量（網膜照度）が低下することから、同じ照明光でも若年者より高齢者の方が暗く感じられることが予想される¹⁾。加えて、老人性縮瞳 (senile miosis)²⁾や調節力（視力）の低下³⁾も伴い、若年者と同じ視覚能力（例えば視力等）を得るためには、若年者に比べて高い照度を必要とすると考えられている⁴⁾。一方、加齢によってグレア（減能グレアと不快グレア）が増大することから、高照度にするにも上限がある⁵⁾。したがって、ある一定の視覚能力（例えば視力や色弁別能）に必要な照度レベルのデータから、高齢者に適した照度レベルを求める場合、以上のような相反する条件を常に考慮しながら検討してい

かなければならない。また、このような視覚能力の限界を意味する閾値データから実用的な照度レベルを推定するには、仮定した必要視覚能力の妥当性を定量的に検討する必要があるが、実際の生活シーンにおいてどの程度の視覚能力（例えば視力）が必要かについての対応関係が明確にされていないため、必要以上の視覚能力を仮定することによって加齢の影響が誇張されたり、逆に必要能力を過小評価することで十分な補償が得られない危険性がある。また、加齢の効果は網膜照度の低下だけではなく、網膜に到達する光の分光特性（実効分光特性）も変化させる。したがって、照明光の分光分布も考慮した定量的検討も必要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使って、実際の照明光が年齢によってどのように変化して網膜に到達しているのかを分光計算シミュレーションによって検討する。また、新聞を読むという生活シーンを取り上げ、その作業時における最適な照度レベルを若年者と高齢者で測定する実験を行い、加齢効果シミュレーションの結果と比較することで、高齢者の実際の照明環境における水晶体加齢効果、ならびに加齢による錐体感度の低下の影響を考察する。本実験の内容は、一般の生活で要求される視覚能力に対して適した照度レベルを求めるという作業タスクであり、閾値実験等に比べてより応用的・実的なデータが得られるという利点がある。また、調節力の低下や

老人性縮瞳等の加齢効果が関与していると考えられる閾値レベルの特性ではなく、「最適照度」というかなり閾上レベルのデータが得られることから、その実験結果は水晶体加齢効果の影響をかなり反映したものになることが予想される。以上のように、本研究では、最適照度に関する実験から若年者と高齢者に対する推奨照度とその両者の関係を具体的に求めるとともに、加齢モデルによる計算シミュレーション結果を用いて実験結果を考察し、高齢者に優しい照明環境を現実的な照度レベルで視覚の加齢効果から論理的に導出できる可能性とその問題点について検討する。

2. 水晶体加齢モデルによる照明光シミュレーション

2.1 水晶体加齢モデル

本研究では、水晶体加齢モデルとして、Pokorny らによって提案されている Two-factor モデル（以下 TF モデル）、Weale の Exponential モデル（以下 Exp モデル）、及び Savage らの Linear モデルを取り上げる⁶⁾。TF モデルは、分光光学濃度 $L(\lambda)$ を年齢 (A) の関数として記述しており、これを $L(\lambda, A)$ とすると、

$$L(\lambda, A) = [1.00 + 0.02(A - 32)] TL_1(\lambda) + TL_2(\lambda)$$
for $20 < A < 60$

$$L(\lambda, A) = [1.56 + 0.0667(A - 60)] TL_1(\lambda) + TL_2(\lambda)$$
for $A > 60$ (1)
と表される⁶⁾⁷⁾。このモデルは、主に Stiles と Burch のカラーマッチングデータ⁸⁾と、Moreland らのデータ⁹⁾から導出されたものであり、年齢によって変化する成分 TL_1 と年齢には関係しない定数成分 TL_2 の2項の線形和で年齢の異なる水晶体の光学濃度を記述する。60歳以下とそれ以上で水晶体の変化率が異なることを考慮し、 TL_1 の係数に60歳を境に異なる値を用いていることが特徴的である。また、Exp モデルの光学濃度 $L(\lambda, A)$ は、

$$L(\lambda, A) = L(\lambda, 0) \exp(\beta(\lambda)A)$$
(2)
で表される⁶⁾¹⁰⁾。 $L(\lambda, 0)$ は出生時の光学濃度、 $\beta(\lambda)$ は実験データから得られた波長に対する関数である。 $L(\lambda, 0)$ と $\beta(\lambda)$ は400 nm から600nm までしか与えられていないため、今回それぞれ650 nm までグラフ上で外挿を行い、TF モデルと比較評価できるようにした。また、Savage らによって提案された Linear モデルは、

$$L(\lambda, A) = [0.013(A - 25.4) + 1] 10^{[5.543 - 0.013439\lambda]}$$
(3)
で表される⁶⁾¹¹⁾。この3つのモデルの特性を比較するために、各モデルから計算された22歳の分光透過率曲線をプロットしたのが図1、同様に70歳の分光透過率曲線をプロットしたのが図2である（具体的な計算方法については次節で述べる）。図2を見ると、TF モデルと Exp モデルの計算結果の類似性に比べ、Linear モデルだけが他の2つと大きく異なる（透過率が相対的にかなり高い）特性を示していることが分かる。Delori らも、Linear モデルは450 nm から600nm の光学濃度を過小評価していると指摘している¹²⁾。したがって、以後の計算シミュレーションでは Linear モデルは用いず、TF モデルと Exp モデルについてのみ検討することにする。ところで、TF モデルは650nm で正規化したモデル⁷⁾であるため、透過率の絶対値の変化が必要な網膜照度比の計算には不適当であると考えられる。しかしながら、TF モデルが抽出水晶体の分光透過率測定結果を精度良く説明できること¹³⁾、及び Pokorny ら自身によって様々な加齢に伴う心理物理実験データを説明できることを検証している⁷⁾ことから、このモデルが現時点では（少なくとも相対分光透過率モデルとしては）最も信頼できるモデルと考えられる。一方、Exp モデルは TF モデルのように正規化を行っていないため、絶対分光透過率を計算できる。図1と

図1 水晶体加齢モデル (TF モデル, Exp モデル, Linear モデル) から得られた22歳の水晶体分光透過率
Fig. 1 Spectral transmittance ratio of the human lens for 22-year-old person derived from Two-factor aging model (bold line), Exponential aging model (solid line) and Linear aging model (dashed line) of the human lens.

図2 水晶体加齢モデル (TF モデル, Exp モデル, Linear モデル) から得られた70歳の水晶体分光透過率
Fig. 2 Spectral transmittance ratio of the human lens for 70-year-old person derived from Two-factor aging model (bold line), Exponential aging model (solid line) and Linear aging model (dashed line) of the human lens.

図2を見ると、両モデルから計算された分光透過率の形状は若干異なっており、波長領域によって上下関係が逆転しているが、両曲線は互いに数ヶ所で交差しており、平均的には両モデルの差（すなわち TF モデルが650nm で正規化している影響）はそれほど大きくないことが予想される（実際、D65白色の場合に約4%、A白色で約7%程度の違いしかないことを2.4節で詳述）。そこで本研究では以後、TF モデルだけでなく、必要に応じてExp モデルを使って計算を行い、計算シミュレーションの信頼性を高めることにする。

2.2 計算シミュレーションの原理

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。ある年齢の水晶体への入射光分光強度を $I(\lambda)$ とし、その出射光分光強度を $I'(\lambda)$ とすると、

$$L(\lambda, A) = \log_{10}(I(\lambda)/I'(\lambda))$$
(4)
の関係が成立するから、水晶体の分光透過率 $\tau(\lambda, A) (=I'(\lambda)/I(\lambda))$ は

$$\tau(\lambda, A) = 10^{-L(\lambda, A)}$$
(5)
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、

$F(\lambda, A_2, A_1) = \tau(\lambda, A_2) / \tau(\lambda, A_1) \dots\dots\dots(6)$
 で求めることができる。物理的に存在可能なフィルターはどの波長の分光透過率が1以下 ($A_1 < A_2$ の場合) であるが、理論的には1を越える透過率 ($A_1 > A_2$ の場合) も計算可能である。ところで最近、高齢者の水晶体を模擬する色フィルター (いわゆる「黄色メガネ」) を用いて若年者が高齢者の視覚を体験できるという試みや、実際にこのような黄色フィルターを用いた実験的研究も行われている¹⁴⁾¹⁵⁾が、理論的に誤ったシミュレーションも多い。このような高齢者視覚シミュレーション用の色フィルターを作成する際には、被験者自身のもつ透過率成分を差し引くために、被験者の年齢を考慮して(6)式を満たす分光透過率を持つフィルターを選択する必要があることを強調しておきたい。

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、年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⁷⁾⁸⁾ことから、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歳の人が(6)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光の量を、「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

$$L(A) = K \sum_{400}^{650} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda, A, 32) \Delta\lambda \dots\dots\dots(7)$$

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 $\tau(\lambda, 32, 32) \equiv 1$ となり、 $L(32)$ は輝度 L と等しい。 A_2 歳の人は A_1 歳の人に比べて ($A_1 < A_2$ 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

$$L(A_2) / L(A_1) \dots\dots\dots(8)$$

倍となる。これを「実効輝度比」と定義する。照明光の照度はその輝度に比例するため、「網膜照度比」は実効輝度比と等しい。したがって、本論文では網膜照度比を(8)式で計算している。また、分光反射率 $\rho(\lambda)$ をもつ物体の反射光の実効輝度 $Y(A)$ は同様に

$$Y(A) = K \sum_{400}^{650} \rho(\lambda) E(\lambda) \bar{y}(\lambda) \tau(\lambda, A, 32) \Delta\lambda \dots\dots\dots(9)$$

と定義する。本論文では、(8)式の実効輝度比のみ用いているので、実際に計算する場合には K や $\Delta\lambda$ の値は(8)式の分子と分母でキャンセルされるため入れていない。

ここでは便宜上、現在の測色学の平均年齢を32歳と仮定したが、年齢間の相対的關係を(8)式を使って検討する場合には、この仮定の影響は相殺される。本論文でも実効輝度比を使って検討するため、何ら問題は生じない。しかし、(7)式や(9)式で得られた値を測色値の絶対値として扱う場合には「標準観測者を32歳と仮定すること」の正当性をさらに議論する必要がある。

2.3 TF モデルによる加齢シミュレーション結果

TF モデル ((1)式) を使って求めた22歳、32歳、50歳、60歳、70歳、80歳の分光透過率を図3に示す。このグラフから、加齢によって主に短波長と中波長の透過率が大きく低下していくことが分

かる。また、(1)式からも明らかなことではあるが、60歳以上で大きな変化が生じることも示されている。図4は、22歳、32歳、40歳、50歳の人が80歳の人と同じ透過率になるために装着するフィルターの分光透過率を(6)式を使ってTFモデルから求めた結果である。被験者の年齢に合わせて図4の分布に合うような色フィルターを装着すれば、平均的に80歳の人と同じ水晶体透過率と等価な眼の状態をシミュレートすることができる。

図5は、TFモデルを用いて、22歳を基準としてD65、D50、A光源の網膜照度比を(7)及び(8)式を使って年齢の関数として求め、プロットしたものである。これを見ると、網膜上の明るさは年齢とともに減少していくこと、及び60歳までの変化に比べてそれ以後の減少率が増大することがわかる。また、加齢に伴う減少率は照明光の種類によっても異なり、今回の3種の照明光の中ではD65照明が最も減少率が大きく、D50、A照明の順で減少率が小さい。これは、加齢による水晶体透過率の減少度が長波長に比べて

図3 水晶体加齢モデル (TF モデル) から得られた各年齢での水晶体分光透過率
 Fig. 3 Spectral transmittance ratio of the human lens for each age derived from Two-factor aging model of the human lens.

図4 TF モデルから算出された80歳の水晶体をシミュレートするための各年齢用フィルターの分光透過率
 Fig. 4 Spectral transmittance ratio of the filters to simulate the lens of the 80-year-old person for young people calculated with Two-factor aging model of the human lens.

図5 TFモデルから算出されたD65, D50, A照明の加齢による網膜照度比の変化
Fig. 5 Retinal illuminance ratio of D65, D50 and A-lights as a function of age calculated with Two-factor aging model of the human lens.

短波長・中波長で大きいため、相対的に長波長成分を多く含むA照明やD50照明の方が相対的に短波長成分を多く含むD65照明に比べて水晶体加齢効果の影響が小さいからである。22歳に比べて70歳の網膜照度比はD65照明で0.75倍、A照明で0.80倍に低下する。これは、70歳の人に対する照度1000 (lx) のD65照明光環境は、22歳の人にとっての750 (lx) の照度レベルに等価であることを示している。したがって、網膜上の実効照度で考えた場合、22歳の人に対するD65照明1000 (lx) と等価な網膜照度を70歳の人に与えるためには、 $1/0.75 \approx 1.333$ 倍の1333 (lx) の照明光が必要であることを意味している。

2.4 Expモデルによる加齢シミュレーション結果

ところで、2.1節で述べたように、TFモデルは650nmで正規化したモデルであるため、同様な計算シミュレーションを絶対透過率モデルであるExpモデルでも行なってみた。その結果、22歳に比べて70歳の網膜照度比はD65照明で0.72倍、A照明で0.75倍に低下することが示された。この結果は、先のTFモデルから得られた結果と大きな違いはないことから、近似的にはTFモデルを絶対透過率モデルのように扱っても網膜照度比等の計算結果に大きな誤差は生じないことを示唆している。しかし、今回はこのモデルによる若干の差(Expモデルの方がTFモデルよりも全体的な透過率が数%程度低く見積もられること)も考慮に入れ、網膜照度比の計算には両モデルを使って計算し、それぞれのモデルから計算された数値の範囲を“水晶体加齢モデルによる計算値”として取り扱い、より信頼性のあるシミュレーションを行うことにする。

2.5 水晶体以外の加齢シミュレーション¹⁶⁾

老人性縮瞳の影響は、薄明視以下の暗い照度レベルにおいては顕著であるが、比較的明るい照度レベルにおいては影響ないと考えられる²⁾。したがって、今回は読書時の最適照度レベルという充分明るい照度レベルを対象としているため、瞳孔径の影響についての検討は行わない。

Wernerらによる高齢者でもユニークホワイトの色度点は若年者と変わらないという実験データ¹⁷⁾、ならびにScheffrinらの若年者と高齢者の色の見えに大きな違いはないというカラーネーミング実験の結果¹⁸⁾は、高齢者でも照明光の色は若年者とほとんど同じ色の見えを呈していることを示しており、高齢者と若年者間の

色の見えの違いを考慮する必要はないことを示唆している。また、色の見えを補償する機構が網膜以降に存在することは明らかであるが、それが明るさの知覚に対してどのように作用するかは明らかとされていない(後述)ため、現時点では色覚系の加齢効果をシミュレーションに組み入れることはできない。そこで、今回は加齢に伴う照度変化のみを検討することにする。

Wernerらの閾値実験の分析結果によると、錐体の感度は10年間で約0.13log減少する¹⁹⁾。本論文では、これを錐体感度低下モデルとして取り扱うことにする。もしこの錐体感度の影響が、最適照明の決定にも影響を及ぼしているとするれば、どのような数値が出てくる可能性があるかを予測できる。上記の減少率から、22歳に対して70歳の人の錐体感度は $-0.624 \log$ 、すなわち0.238倍に低下することになる。これと水晶体の網膜照度低下を併せると、D65白色の場合、トータルでおよそ0.175倍の照明効率(高齢者の錐体に若年者と同じ出力を与える照明光の照度の倍率の逆数)の低下が見込まれる。もし、この錐体感度の低下がそのまま明るさ知覚に影響している(すなわち高齢者も若年者と同じ錐体出力が得られると同じ明るさ知覚を得る)と仮定すれば、70歳の人の最適照度は22歳の人の5.7倍(0.175の逆数)程度になることが予想される。

また、Kraftらによると、高齢者の明るさ分光感度の実験結果から、短波長領域で(約2倍程度の)明るさ補償が行われていることが示されている²⁰⁾。しかし、この明るさ分光感度は相対感度であるため、絶対的レベルでどの程度明るさ知覚が補償されているかは不明である。黄色付近の感度は不変であると仮定しても、明るさは加法性が成立しないために、白色照明の場合はどのように補償されるのかは計算不可能である。仮に黄色付近の単色光と同じとすれば、先の仮定(黄色の明るさは変化しない)から明るさ補償は考えなくてよいということになる。したがって、現時点では白色光の明るさ補償を定量的にシミュレートできないため、今回は考慮しない。

次に、読書時の最適照度を青年と高齢者で実際に測定し、その実験結果が以上のような水晶体や他の部位の加齢効果によってどの程度説明できるかを検討することにする。

3. 若年者と高齢者における読書時の最適照度レベルの測定

3.1 目的と原理

本実験の目的は、高齢者に必要な照度レベルを、より一般的な日常生活場面において求めること、及び水晶体の加齢効果によってその結果を説明できるかどうかを検討することにある。調節力(視力)の低下や老人性縮瞳の影響が入りにくく、神経系の加齢効果も無視できるような照明条件下では、水晶体の加齢効果が強く反映するデータが得られることが予想される。具体的には、高齢者でも無理なく識別できるような視対象を用いることで、調節力(視力)の影響を排除することができる。また、閾値レベルよりもかなり高い照度レベルを使うことで、暗い環境下で問題になる老人性縮瞳の影響も除去できる。また、高齢者の色弁別や色認識のデータ¹⁶⁾¹⁸⁾から、神経系の加齢効果は入力光のレベルが小さい場合や細かな色の識別を行う場合にのみ影響することから、閾上の比較的高い照度レベルを使うことで神経系の加齢効果も無視できると考えられる。さらに、高齢者にとって最適な、あるいは好ましい照度レベルを設定してもらうことで、グレアの影響も入らない照度レンジを求めることができると期待される。

そこで本研究では、照度を変えながら被験者に新聞を読んでもらい、最も読みやすい「最適照度(optimal illuminance)」を測定

し、若年者と高齢者の結果を比較するための実験を行った。読書は生活において一般的に行われていることであり、その最適照度レベルを測定することは応用上重要である。また、本実験では最適照度を測定するため、その結果には以上述べてきたように水晶体の加齢効果が大きく影響することが予想され、水晶体加齢モデルによる分析の有効性を検討することができると考えられる。

「最適照度」は作業タスクのみならず、それ以前の順応状態によっても大きく異なることが予想される。そこで本実験では、暗順応状態から照度を上げていく系列と、非常に明るい照度レベルから徐々に照度を下げていく系列で、それぞれ「最適照度」を測定し、最適照度領域の上限と下限とする。実際の生活場面では、事前の順応状態は変化するため特定できないが、ここでは最適照度領域の上限と下限の（幾何）平均値を「最適照度の代表値」と定義し、高齢者と青年の結果を比較・検討することとした。

3.2 装置と刺激

天井面に調光可能な19本の蛍光灯を設置でき、壁面には黒い布、床面には黒色の無光沢塗装仕上げを施してある照明実験用暗室内（大きさ：1.8m×1.8m×1.8m）に、イスと机を配置して実験を行なった。蛍光灯には松下電器産業社製の次の2種類を用いた。

- ・蛍光灯1：高演色性直管型 FL40S・L—EDL/M（電球色）
- ・蛍光灯2：高演色性直管型 FL40S・N—EDL/M（昼白色）

視対象には、新聞の切り抜き（朝日新聞朝刊「声」欄）を用いた。文字の大きさは約9ポイント、背景（白）と文字（黒）の反射率比は約4：1である。新聞の切り抜きは被験者の眼から距離30cmの机の上に置いた。本条件（30cmの距離で9ポイント文字）の必要近点視力は約0.4であり²¹⁾、これは高齢者の被験者でも問題なく読める大きさであった³⁾。照度は照度計 IM-3（トプコン社製）、新聞の分光反射率は PR-650（Photo Research 社製）で測定した。

3.3 被験者

64歳から77歳の白内障等の眼疾患のない高齢者28名（男性22名、女性6名、平均年齢68.7歳）と、18歳から26歳の青年16名（男性12名、女性4名、平均年齢22.2歳）が被験者として実験に参加した。眼疾患の有無は、被験者の自己申告及び実験者が被験者の瞳孔を覗いて水晶体に目立った濁りがないかを観察することで調べた。青年の数名は2種の蛍光灯条件のうちいずれかだけに参加した。高齢の被験者のうち、4名が裸眼、あとの24名は眼鏡による矯正をしていた。青年の被験者も5名が裸眼で、あとの11名は眼鏡またはコンタクトを装着していた。

3.4 手順

被験者に新聞を読んでもらいながら実験者がゆっくり照度を変化させ、「最も読みやすい明るさ」になった時に被験者が応答し、その時の照度を実験者が記録するという方法で読書時の最適照度を測定した。照度の変化は、照度上昇系列と照度下降系列を続けて行った。照度上昇系列を始める前に被験者は5分間暗順応し、暗い状態から徐々に照度をあげていき、最も読みやすくなった時の机上面照度を測定した。次に照度下降系列として3500（lx）から徐々に照度を下げていき、最も読みやすくなった時の机上面照度を測定した。どちらの系列も、照度を変えていた時間は30秒程度であった。また、本実験の前に予備実験を行い、最も読みやすい照度レベルがこの方法で測定可能であることを確認した。照度上昇系列と照度下降系列を1回ずつで1トライアルとし、これを電球色と昼白色の蛍光灯条件で各5回ずつ測定した。

3.5 結果

各蛍光灯条件で各被験者とも各系列で5回の測定を行ったが、各被験者のデータから最大と最小の値を除いた3回のデータのみを分析に用いた。被験者の視力は高齢者のグループが0.3から1.5、青年のグループは0.7から2.0で分布していたが、被験者の視力と実験結果（最適照度）の間に相関は見られなかった。また、青年のデータ内と高齢者のデータ内では、年齢に対する相関はなかった（回帰直線の傾きがほぼ0）ので、青年被験者と高齢者被験者の結果を各グループのほぼ平均年齢間（22歳 vs.70歳）で比較することにする。2つの蛍光灯条件それぞれにおいて、青年グループと高齢者グループの照度上昇系列と照度下降系列の各データの平均値を求め、以後の分析に用いる。平均値の計算には、ウェーバー・フェヒナー則を考慮して照度の対数値の平均（幾何平均）を用いた。

本実験では、照度上昇系列と照度下降系列でそれぞれ最適照度を求めた。これは、最適照度の判定が事前の順応状態に大きく影響されると予想したためである。図6は、青年と高齢者の照度上昇系列と照度下降系列での最適照度の平均値を蛍光灯条件別に示したものである。表1にそれぞれの数値を示す。浮いた状態でプロットされている各棒の底辺の位置が照度上昇系列で得られた最適照度値、各棒の上辺の位置が照度下降系列で得られた最適照度値を示す。このグラフから、照度上昇系列と照度下降系列では最適照度値が異なり、照度下降系列での最適照度の方が照度上昇系列の時の最適照度よりも高いことが分かる。照度下降系列と照度上昇系列のデータに対して統計的検定を行なってみたところ、青年の場合は両蛍光灯条件とも非常に高度な有意差（ $p < 0.001$ ）が、高齢者の場合も電球色で高度な有意差（ $p < 0.01$ ）、昼白色でも有意な差（ $p < 0.05$ ）があることが示された。したがって、眼の状態によって最適照度の値は異なることが示されたわけであ

図6 各蛍光灯条件での青年と高齢者の最適照明領域
Fig. 6 Range of the optimal illuminance for the young and the aged subjects under each fluorescent lamp condition.

表1 各蛍光ランプでの最適照度の上限・下限値、代表値とその各倍率（＝高齢者の照度／青年の照度）、及び水晶体モデルのみと錐体感度低下モデルも考慮した場合の予測倍率。

蛍光ランプ条件	電 球 色		
被験者グループ	青 年	高 齢 者	倍 率
上限平均値	445lx	701lx	1.58
下限平均値	861lx	864lx	1.00
最適照度の代表値	619lx	778lx	1.26
水晶体モデル予測値			1.24～1.32
錐体感度低下モデル予測値			5.21～5.54

蛍光ランプ条件	昼 白 色		
被験者グループ	青 年	高 齢 者	倍 率
上限平均値	400lx	803lx	2.01
下限平均値	805lx	1054lx	1.31
最適照度の代表値	568lx	920lx	1.62
水晶体モデル予測値			1.31～1.37
錐体感度低下モデル予測値			5.50～5.75

る。両系列での最適照度を青年と高齢者で比較すると、電球色条件の照度下降系列の場合を除いて、高齢者の方が青年よりも高い照度レベルとなっている。これについても統計的検定を行なったところ、両蛍光ランプ条件とも照度上昇系列のデータは青年と高齢者の間に高度な有意差 ($p < 0.01$) があり、昼白色の照度下降系列でも青年と高齢者の間に有意差 ($p < 0.05$) があるが、電球色の照度下降系列のデータに青年と高齢者の間に有意差は見られないことが示された。以上のことから、高齢者の方が青年に比べて一般に高い照度を必要とすることが示唆される。また、青年と高齢者の結果の違いは、照度上昇系列の時の方が照度下降系列の時よりも大きい。この原因の1つとして、照度下降系列時の最適照度値はかなり高くなるが、高齢者にとって不快グレアが発生しやすくなるために、照度レベルを低めに設定した可能性が考えられる。あるいは、高齢者の方が青年に比べて照明効率が低いため、照度下降系列時の初期状態 (3500lx) が青年よりも暗い状態から開始したことになり、その影響で最適照度値が低めに回答された可能性もある。一般的に、高齢者の照度基準を考える際に、高齢者は若年者の一律何倍といった形で議論されることが多い。しかし本実験の結果は、最低限必要な下限値とそれ以上越えてはならない上限値とは異なる変換基準を適用する必要があることを示唆している。

高齢者も青年も、電球色と昼白色で最適照度レベルが異なっていることが示された。このことは、作業タスクが同じでも照明の色温度によって最適照度レベルが異なることを示唆している。また、高齢者の場合は高い色温度の昼白色の方が低い色温度の電球色よりも最適照度レベルが高いが、青年の場合は逆に色温度が低い電球色の方が高い最適照度になるという結果が得られており、傾向が一致していない。この結果は、最適照度あるいは快適照度の色温度による違いの傾向が、青年と高齢者で異なることを示唆しており、高齢者の最適照度を考える上で今後詳細な検討が必要であろう。

3.6 考察

図6の結果から、前順応が明るい時ほどその直後の最適照度も高くなることが示唆された。したがって、好ましい照度レベルは

図7 各蛍光ランプ条件での青年と高齢者の最適照明の代表値

Fig.7 Typical values of the optimal illuminance for the young and the aged subjects under each fluorescent lamp condition.

ある広がりをもつ照度領域で表され、照度上昇系列と照度下降系列で求めた最適照度とその照度領域の下限と上限と考えることができる。このことは、先に示した統計的検定結果からも有意に示された。したがって、図6の浮いている棒の部分を最適照度領域と考えることにする。日常の生活において、眼の順応状態を常に特定することは不可能であるが、この最適照度領域内にその時その時の最適照度値が存在すると考えることができる。今回は下限と上限の幾何平均値をそれぞれの最適照度の代表値として求め、水晶体加齢モデルと錐体感度低下モデルを用いて定量的な比較・検討を行なうことにする。図7に各蛍光ランプ条件における青年と高齢者の最適照度の代表値を示す。また、表1に最適照度の上限・下限、代表値とその各倍率を示す。

青年と高齢者で最適照度の代表値を比較すると、電球色の場合で1.26倍、昼白色の場合で1.62倍の違いがある。そこで、この違いが水晶体加齢モデルと錐体感度低下モデルによって説明できるか検討する。まず、実際に用いた蛍光ランプの分光分布から2つの水晶体加齢モデル (TF モデルと Exp モデル) を用いて各年齢における照明効率を計算した。計算方法は先に説明した計算シミュレーションと同様であるが、照明光の分光エネルギー $E(\lambda)$ に実験に用いた蛍光ランプの分光データを用いて再計算した。計算結果は、電球色蛍光ランプは A 照明と、昼白色蛍光ランプは D65 照明の結果 (図5) とほぼ同じであった。また、新聞紙の白部分の分光反射率を測定し、(8)式を用いて実効輝度比も計算してみたが、照明光だけの計算結果とほとんど違いがなかった (差は2%未満)。この計算結果から得られた22歳と70歳の網膜照度比は、電球色で1.24～1.32倍、昼白色で1.31～1.37倍となった (表1)。この数値を実験値と比較すると、電球色蛍光ランプの結果は水晶体加齢モデルから予想される実効照度比とほぼ一致 (実験値1.26vs. 予測中央値1.28) するが、昼白色蛍光ランプの結果は水晶体加齢モデルから予想される以上に差があること (実験値1.62vs. 予測中央値1.34) が分かる。輝度や照度を求める場合、(6)式のように分光感度として等色関数 $\bar{y}(\lambda)$ を用いて計算するが、この分光感度関数は短波長領域の感度が実際よりも低く見積もられているため、心理物理学では Judd 修正等色関数 $\bar{y}'(\lambda)$ を使うことが多い²²⁾。昼白色は電球色に比べて短波長成分が多いため、Judd 修正されていない $\bar{y}(\lambda)$ では加齢の効果が過小評価される可能性があ

る。そこで、 $\bar{y}(\lambda)$ の代りに $\bar{y}'(\lambda)$ を用いて照明実効値を再計算してみたが、 $\bar{y}(\lambda)$ の場合と結果はほとんど変わらなかった。したがって、Judd 修正等色関数を用いても、水晶体加齢モデルだけでは昼白色の青年と高齢者の最適照度代表値の違いを完全には説明できないことが示された。しかしながら、水晶体加齢モデルを用いて計算した色温度が異なる網膜照度比の予測値は、実験データの傾向を定性的に説明している。すなわち、青年の最適照度に対して、昼白色時の高齢者の最適照度は電球色の場合に比べて高い倍率の照度を必要とするということである。また、今回は「最適」な照度を求めているが、許容できる照度レンジは今回得られた最適照度レンジよりも広いことが推測される。したがって、青年に対する高齢者の最適照度の増大は、第1近似的には加齢による水晶体の透過率減少分を補償した形になっていると考えてもよさそうである。

一方、錐体感度低下モデルも考慮して照度倍率を計算した結果も表1に示した。この数値は、先に2.5節で示した Werner らの錐体感度低下モデルによる22歳に対する70歳の錐体感度の低下率（ $-0.624\log$ 、すなわち0.238倍）に水晶体加齢モデルから得られた網膜照度の減少率を乗じた値の逆数を示したものである。この予測値と実験結果を比較すると、かなり大きな違いが見られる。したがって、今回の実験データは錐体感度低下モデルでは説明できないことが示された。これは、閾値実験で得られた高齢者の錐体感度低下特性¹⁹⁾が、今回の様な比較的明るい照度レベルにおける最適照度の評価にはそのまま反映されるわけではないことを示唆している。

水晶体加齢モデルによって、電球色での最適照度の実験結果がほぼ説明できることが示されたが、昼白色の場合を完全に説明できなかった理由として、水晶体加齢モデルの不適合が考えられる。すなわち、TF モデルも Exp モデルも主に日本人以外のデータを基に作成されたものであるため、実際の日本人の水晶体加齢変化を忠実に表していないという可能性がある。もし、用いたモデルよりも実際の短波長透過率の減衰が大きい場合、短波長成分を比較的豊富に含む昼白色において、モデルによる青年と高齢者の効率差が過小評価されることになる。この可能性の是非については、用いたモデルが日本人の水晶体の年齢効果についても精度良く適用できるのかを実験的に検証した上で判断する必要がある。また、これ以外に考えられる要因として、色温度によって好ましい照度が異なるという特性が、青年と高齢者で傾向が異なる可能性があげられる。図6を見ると、青年の場合は電球色よりも昼白色で最適照度を低く設定している一方、高齢者は逆に昼白色よりも電球色で最適照度を低く設定している。もし、前述の様に標準観測者の年齢を32歳と仮定した場合、22歳では同じ照度でも短波長成分を多く含む昼白色の方が電球色よりも実効照度は高くなるため（計算すると1%弱）、電球色よりも昼白色の方が低い照度値を示すことが予想されるが、実験結果ほどの差（代表値間で約9%）を完全に説明できるものではない。この色温度の違いに対する青年と高齢者の傾向の差が、昼白色時の青年と高齢者の最適照度の違いを大きくし、結果的に網膜上の明るさ効率だけから予測される倍率以上の違いとなった可能性がある。これは、高齢者の最適照度を考える場合、水晶体の加齢から算出される照明効率だけではなく、被験者の好ましさの印象に関係する色温度の違いも考慮する必要があることを示唆しており、年齢による好ましい照度に対する色温度の影響を実験的に明らかにしていく必要があることを示唆している。

最適照度の代表値だけではなく、下限と上限の倍率についても言及しておく。表1または図6から、青年と高齢者の最適照度比は、両蛍光ランプ条件とも下限と上限で異なり、下限の方が上限よりも高い照度比になる（すなわち高齢者に対して照度が必要となる）ことを示している。この倍率の違いは、低照度の場合に加齢の影響が大きくなることを意味しており、高齢者に対する照度を一律に青年の何倍と決めるのではなく、低照度の場合は大きめに、高照度の場合には小さめに倍率を設定する必要があることを示唆している。水晶体加齢モデルから予測された照度倍率は、下限と上限の倍率間に存在する（表1）。また、図6のように高齢者の最適照度幅（上限と下限の差）が青年の半分程度であることから、（主に若年者用に）最適照度レンジが設定されている場合、その最適照度レンジの中間領域付近だけを切り取り、水晶体加齢モデルから予想される倍率だけ照度レベルを上げたものを高齢者に適用するというのも実用的には有効な手段と考えられる。

4. 総合的考察

本研究では、主に水晶体の加齢効果について言及したが、他の眼光学系（角膜、瞳孔等）にも加齢効果は見られる。しかし、角膜全体は加齢とともに垂直方向に平坦化する²³⁾が、分光透過特性は年齢による違いがない²⁴⁾。瞳孔径が20歳前後の半分程度（2mm）になる老人性縮瞳は、瞳孔散大筋の萎縮、瞳孔括約筋下の硝子様物質の沈着、対光反応に関与する網膜視細胞の現象が原因と考えられている²⁵⁾が、これも暗い環境下では問題になるが、瞳孔が小さくなる明るい環境の場合は問題にならないと考えられる。したがって、眼光学系については、水晶体の加齢効果でほぼ説明が可能と考えられる¹⁶⁾。また、調節力の衰えも問題になるが、本実験では高齢者にも十分に読める文字の大きさの視対象を用いたので問題とはならない。さらに、網膜の視細胞及び網膜以降の神経系の加齢も存在するが、比較的高い照度レベルでは大きな影響はないことが推測される¹⁶⁾。実際、本研究においても、加齢による錐体の感度低下データ¹⁹⁾から計算された値と本実験のデータは一致せず、水晶体の加齢効果から予測された値が実験データを数値的によく説明することができた。このような結果が得られたのは、本実験の条件下では閾値レベルの調節力や神経系の加齢効果が大きく影響しなかったためと考えられる。日常生活における照明環境は、必要最小限の照明ではなく、快適なレベルを必要とする。したがって、閾値を表すデータよりも、本実験のような高齢者にとって好ましい照明レベルが若年者にくらべてどの程度異なるのかを調べるのが重要であると考えられる。

本実験の結果から、高齢者にとって適当な照度レベルは、高齢者にとって困難な作業でない限り、平均として若年者の1.3~1.6倍程度、低い照度レベルでも高々2倍程度で十分であることが示唆された。本研究では平均年齢約22歳の青年の照度を基準にして高齢者の照度を検討したが、実際の照明基準を作成する際に基になったデータの被験者の平均年齢と、対象とする高齢者の年齢を想定して倍率を検討する必要がある。例えば、被験者の平均年齢を40歳とした照明基準があるとする、それを80歳の人に対して適用するには電球色で1.31倍、昼白色で1.40倍必要であることが水晶体加齢モデルから求められる。また、図6に示されているように、高齢者の最適照度レンジは青年に比べてレベルが高いだけではなく、レンジ幅も狭いことに注意する必要がある。すなわち、高齢者の方が許容できる照度範囲が小さいということも、高齢者の照明を考える上で重要な要素であるといえる。また、本論文で

は幅のある最適照度のレンジを便宜的にその下限と上限の幾何平均値で代表させて結果を比較したが、この「代表値」の取り方についても今後さらに検討が必要と考えられる。実環境での照度は1つの値しか取り得ないため、最適照度レンジの中のどの値が最も適当なのかを検討し、その値を「代表値」とすべきであろう。さらに、高齢者と若年者は同じ環境の中で生活をしていることが多いため、実際の照明環境には高齢者と若年者が共に快適に感じる照度レベルを設定することが要求される。この場合、青年の方が最適照度のレンジ幅の広いことを考慮すると、その環境で最も高齢な人を優先して照度レベルを設定し、それよりも若い人にも適用できるように再調整するといった方法が現実的かと思われる。

本実験の結果から、昼白色よりも電球色の方が青年と高齢者の最適照度の差は小さいことが示され、その傾向は水晶体の加齢特性から推定された傾向と同じであった。したがって、本研究の結果から、昼白色よりも電球色の方が青年と高齢者が共に快適に感じる照度を容易に設定できることが示唆されたわけである。しかし、昼白色と電球色のどちらを好ましく思うかには個人差もあり、一概に電球色が優れていると結論づけることはできない。また、最適照度には年齢差だけではなく、同じ年代の被験者の中にも個人差があること、照明の色温度によって最適照度が異なること、及び順応環境条件が状況によって異なることから、代表値を中心にして今回得られた青年と高齢者の最適照度レンジ内で照度を自由にコントロールできるようなハードウェアの整備も、年齢にかかわらず各個人が快適に過ごせる照明環境を実現するために有効な方法と考えられる。

本研究の結果から、照明に関するデータを取得する際は、被験者の年齢についても明記または統制する必要があることが示唆される。また、照明に関する実験データの個人差のいくつかは、被験者の年齢の違いによって説明できるものと推測される。例えば照明光に D65を用いた場合、22歳の被験者に対して50歳で約10%、70歳で25%の実効輝度差が既に網膜レベルで生じている可能性があることを、常に考慮しておく必要がある。

また、本実験の結果は、数値的には水晶体の加齢モデルから計算された値とほぼ一致していたが、視覚系には加齢による劣化と補償機能が複雑に介在しており¹⁶⁾²⁵⁾、今回も全体として水晶体加齢効果分のみが実験データに現れただけにすぎないという可能性も否定できない。例えば、今回の実験データからは錐体の加齢による感度低下の影響¹⁹⁾が見られなかったが、明るさ補償のメカニズム²⁰⁾がこの錐体感度低下を補っていた可能性もある。したがって本研究の結果は、水晶体加齢効果のみでメカニズム的に照明実験データを説明できると結論づけるものではなく、現時点では数値的に説明できたと考えるに留めておく必要がある。水晶体以外の加齢効果（劣化と補償）が照明評価の際に具体的にどのように関与しているかを明らかにすることは、視覚の加齢効果をもたらす生理学的メカニズムと応用場面における照明設計の理論を論理的に結ぶために重要な課題であり、今後の研究に期待したい。

本研究では高齢者にとって容易な作業タスクにおける最適照度を測定したが、遠方の細かいものを見る場合の最適照度や、非常に暗い条件下での必要照度については、水晶体加齢効果のみではなく、他の様々な加齢効果を考慮する必要があると考えられる。また、本研究では照度が大きな影響を及ぼす「新聞を読む」という作業タスクについてのみ検討したため、色の影響については取り扱わなかった。しかし、色の細かい識別を必要とする作業タス

クにおいては、水晶体の加齢によって網膜に到達する光の分光特性等を考慮する必要があると考えられる¹⁸⁾。今後は、さらに多くの作業タスク及び評価基準において、高齢者にとって適した照明環境を実現するための実験的研究、ならびに神経系も含めた加齢モデルを定式化するための理論的研究が必要であろう。本研究で試みた視覚の加齢効果を数値的にシミュレートするという分析手法は、各部位（例えば水晶体、瞳孔径等）の加齢効果の影響量を定量的に評価できるとともに、加齢効果そのものを調べていくための研究手法として有効性が高いと考えられる。

5. まとめ

本研究では、Pokorny らの水晶体加齢モデル(Two-factor モデル)と Weale の水晶体加齢モデル(Exponential モデル)を用いて、D65, D50, A 各照明光の年齢による網膜に到達する光の効率変化を数値的に求めた。照明光の分光分布によって加齢に伴う網膜照度の減少率に違いがあることを明らかにし、A 照明(電球色)が D65照明(昼白色)よりも加齢による網膜照度の減少率が小さいことを示した。また、青年と高齢者で新聞を読む際の最適照度を測定する実験を行ない、高齢者の方が青年よりも最適照度レベルが高いこと、ならびに青年と高齢者の最適照度の差は電球色の場合の方が昼白色の場合よりも小さいことを示した。さらに、この青年と高齢者の最適照度の違いは、水晶体加齢モデルによってかなりの部分を説明できることを示した。今後は、水晶体加齢モデルによる照明環境の検討が、どのような生活シーンや作業タスクまで適用可能なかを明らかにするとともに、他の加齢効果(瞳孔径、網膜感度、色弁別、神経系)の影響までも考慮した高齢者に優しい照明環境の実現に向けて、さらに実験及び理論的研究を進めていく必要がある。

最後に、本研究を論文にまとめるにあたり、ご協力をいただいた東京大学医学部眼科の長澤和弘氏、ならびに有益な助言をいただいた高知工科大学の篠森敬三氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) F. S. Said and R. A. Weale : "The Variation with Age of the Spectral Transmissivity of the Living Human Crystalline Lens", *Gerontologia*, 3, pp.213-231 (1959).
- (2) 沖坂重邦 : 「虹彩の加齢変化」, *眼科*, 28, pp.595-603(1986).
- (3) 戸張幾生 : 「老人の視力と白内障」, *眼科*, 26, pp.403-408 (1984).
- (4) 照明学会 : 新時代における照明の調査研究報告書, pp.40-49 (昭59).
- (5) 照明学会 : 高齢化社会における照明の研究調査委員会報告書, pp.34-35 (昭62).
- (6) J. Xu, J. Pokorny and V. C. Smith : "Optical Density of the Human Lens", *J. Opt. Soc. Am.*, A14, pp.953-960 (1997).
- (7) J. Pokorny, V. C. Smith and M. Lutze : "Aging of the Human Lens", *Appl. Opt.* 26, pp.1437-1440 (1987).
- (8) 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, pp.168-181 (1955).
- (9) J. D. Moreland : "Temporal Variations in Anomaloscope Equations", *Mod. Probl. Ophthalmol.*, 19, pp.167-

- 172 (1978).
- (10) R. A. Weale: "Age and the Transmittance of the Human Crystalline Lens", J. of Physiology, 395, pp.577-587 (1988).
 - (11) G. L. Savage, G. Haegerstrom-Portnoy, A. J. Adams and S. E. Hewlett: "Age Changes in the Optical Density of Human Ocular Media", Clin. Vision Sci., 8, pp.97-108 (1993).
 - (12) F. C. Delori and S. A. Burns: "Fundus Reflectance of the Measurement of Crystalline Lens Density", J. Opt. Soc. Am., A13, pp.215-226 (1996).
 - (13) T. J. T. P. Van Den Berg and J. Feliu: "Relationship between Spectral Transmittance and Slit Lamp Color of Human Lenses", Invest. Ophthalmol. Vis. Sci., 36, pp.322-329 (1995).
 - (14) C. A. Ako and S. Sakuraba: "The Use of Films to Simulate Age-Related Declines in Yellow Vision", J. of Occupational Rehabilitation, 6, pp.119-134 (1996).
 - (15) 吉田, 桜庭: 「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, pp.79-86 (1996).
 - (16) 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, pp.89-96 (1997).
 - (17) J. S. Werner and B. E. Scheffrin: "Loci Achromatic Points throughout the Life Span", J. Opt. Soc. Am., A10, pp.1509-1516 (1993).
 - (18) B. E. Scheffrin and J. S. Werner: "Age-Related Changes in the Color Appearance of Broadband Surfaces", Color Res. Appl., 18, pp.380-389 (1993).
 - (19) J. S. Werner and V. G. Steele: "Sensitivity of Human Foveal Color Mechanisms Throughout the Life Span", J. Opt. Soc. Am., A12, pp.2122-2130 (1988).
 - (20) J. M. Kraft and J. S. Werner: "Spectral Efficiency across the Life Span: Flicker Photometry and Brightness Matching", J. Opt. Soc. Am., A11-4, pp.1213-1221 (1994).

- (21) 所敬: 「活字と視力」, 眼科, 27, p.1245 (1985).
- (22) J. J. Vos and P. L. Walraven: "On the Derivation of the Foveal Receptor Primaries", Vision Res. 11, pp.799-818 (1978).
- (23) 稲葉和代: 「角膜の加齢変化」, 眼科, 28, pp.587-594 (1986).
- (24) T. J. T. P. Van Den Berg and K. E. W. P. Tan: "Light Transmittance of the Human Cornea from 320 to 700nm for Different Ages", Vision Res., 14, pp.1453-1456 (1994).
- (25) 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, pp.621-645 (1996).

(受付日1998年1月8日/採録日1998年6月4日)

おかじま かつのり
岡嶋 克典 (正会員)

防衛大学校応用物理学教室

昭和37年9月17日生, 平成2年東京工業大学大学院博士課程(物理情報工学専攻)修了, 工学博士。現在, 防衛大学校応用物理学教室助教授。視覚情報処理, 照明・色彩工学、バーチャルリアリティ等の研究・教育に従事。応用物理学会, 日本光学会, 日本視覚学会, 日本色彩学会, 日本照明委員会, OSA, ARVO 他会員。

いわた みちこ
岩田三千子 (正会員)

摂南大学工学部建築学科

昭和31年3月27日生まれ, 昭和53年3月日本女子大学家政学部住居学科卒業。平成3年3月大阪市立大学学術博士取得, 現在摂南大学助教授。建築環境工学, 建築環境工学演習, 建築CADの講義を担当。建築・都市における高齢者や障害者の視環境をはじめとする生活環境の研究に従事。日本建築学会, 日本生理人類学会, 日本インテリア学会ほか会員。