加齢の影響を加味した視認性評価方法 — 一年齢別等視力曲線の作成 —

正会員 岩 井 彌 (松下電工株式会社)

Method for Evaluating Visibility in Different Ages

Member Wataru Iwai (Matsushita Electric Works, Ltd.)

KEYWORDS : visibility, human aging, luminance difference threshold, visual acuity

1. 緒言

国連の定義における高齢社会に我が国も突入し、各業界において、高齢者対応商品の開発が急務となっている。特に、活動のために必要な情報の多くを取得する視覚系の加齢に伴う能力の低下は、他身体機能に比べて著しいことが知られており¹⁾、この視機能の低下を補うことのできる照明に期待するところは大きい。さらに、読書作業時における文字の読みやすさ等の必要な視認性を確保するための所要照度等の照明設計値の設定は重要な課題であると言える。

そこで本論文では、これら照明設計をする上で実用的な、加齢の影響を加味した視認性評価方法の構築を試みている。今回は特に、高齢者の生活の中心が屋内空間であることから、屋内照明の照明設計に用いることを前提に検討を進める。

2. 輝度差弁別閾にもとづく視認性評価方法

ここで述べる視認性とは、「見えるか見えないか」、または「見えやすいか見えにくい」と表現されるものであり、対象と背景との弁別にもとづくものである。従って、視認性を評価するためにはまず、対象と背景との輝度差に対する弁別閾である輝度差弁別閾の把握が必要となる。その上で、対象の輝度とその背景との差が、輝度差弁別閾より大きい、小さいか、または、どの程度大きいかで視認性を評価することができる。

Blackwell²⁾やAdrian³⁾は、視認性評価モデルとして、輝度差弁別閾にもとづく Visibility Level (以下、VL と記す) 算出モデルを提案している。また、この VL の実際の視環境における所要値を検討した報告としては、CRT ディスプレイ上の表示文字を対象とした田淵の報告⁴⁾や交通表示灯を対象としたIwaiらの報告⁵⁾、そして、道路灯を対象としたNarisadaら⁶⁾やAdrianら⁷⁾の報告などがあり、所要 VL 値をもとに所要輝度などの照明設計値を算出する方法の有効性が明らかにされている。

この VL は、下記式に示すように、対象の輝度 L_t (cd/m²) と背景の輝度 L_b (cd/m²) との輝度差が、輝度差弁別閾 ΔL_{min} の何倍の差を有しているのかを表わしたものである。

$$VL = |L_t - L_b| / \Delta L_{min} \quad \dots\dots\dots (1)$$

そして、この VL が必要な値になるように照明設計を行えば良

いと言うのが、VL にもとづく照明設計法の考え方である。

他に提案されている視認性の評価方法としては、「文字の読みやすさ」を対象とした佐藤ら⁹⁾や中根¹⁰⁾の提案する見やすさレベル (Visual Ease Level : VEL) を挙げることができる。佐藤らは、視対象の大きさ α が図の大きさ α_{min} に対して持つ大きさの倍率 ($VEL = \alpha / \alpha_{min}$) を用い、そして、中根は視認図を与える背景輝度 (L_{bmin}) に対する実際の背景輝度 (L_b) が持つ倍率 ($VEL = L_b / L_{bmin}$) を用いて、「文字の読みやすさ」を規定する方法をそれぞれ提案している。

以上述べてきた VL にもとづく方法と VEL にもとづく方法、いずれの方法においても重要となるのは、背景輝度や視対象の大きさ等の視認性に影響を与える条件と、輝度差弁別閾 ΔL_{min} 等の視認閾値との関係の把握である。

3. 加齢の影響を加味した輝度差弁別閾の算出モデル

以上述べてきたことから、視認性を評価する上で必要なのは、視認性に影響を与える各条件から視認閾値を算出する方法の確立であることが分る。そして今回の場合、これら条件の中に観察者の年齢が加わる。

Blackwell や Adrian が報告した VL に基づく視認性評価モデルで使われている輝度差弁別閾算出モデル²⁾³⁾でも加齢の影響が加味されているが、それらモデル式の構造は類似しており、次の(2)式のような形で記述することができる。

$$\Delta L_{min}(A) = AF(A) \cdot \Delta L_{min,Y} \{L_b + K_a(A) \cdot L_{eq}\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

A : 年齢 (才)

$\Delta L_{min}(A)$: A 才時の輝度差弁別閾 (cd/m²)

$\Delta L_{min,Y}$: 20代の輝度差弁別閾 (cd/m²)

L_b : 背景輝度 (cd/m²)

L_{eq} : 等価光幕輝度 (cd/m²)

$AF(A)$: A 才時の20才代に対する輝度差弁別閾上昇係数

$K_a(A)$: A 才時の20才代に対する等価光幕輝度上昇係数

ここで加齢により変化するものは、加齢に伴う輝度差弁別閾の上昇を示した係数 AF と、等価光幕輝度の上昇を示した係数 K_a である。すなわちこの式は、加齢に伴う水晶体の透過率の低下や視神経機能の低下による輝度差弁別閾の上昇だけでなく、眼球内

光学系の光の散乱によって生じ、視野に重畳する等価光幕輝度の加齢に伴う上昇から起こる輝度差弁別閾の上昇も加味されている。

今回ここでは、式(2)で示される輝度差弁別閾の算出モデルをもとに加齢の影響を加味した視認性評価方法を検討する。

4. 等視力曲線を用いた輝度差弁別閾の算出

上記(2)式で、まず必要となるのは、20代の輝度差弁別閾である。均一な背景に対する背景輝度と輝度差弁別閾の関係は、数多くの研究者によって報告されており、前述の Blackwell や Adrian もその関係式を定式化している。それら既往研究によれば、輝度差弁別閾は、加齢の影響だけでなく、対象のサイズ¹¹⁾、対象の呈示時間¹²⁾などの影響も受ける。

これら要因は、基本的な輝度差弁別閾（例えば、時間的にも空間的にも十分大きな条件で得られる最小輝度差弁別閾）に、条件に応じた係数をかけることで、その影響を異なる条件下で得られる輝度差弁別閾に反映させることが可能である¹³⁾。しかし、これら要因の中で、照明設計に最も関連の深い対象のサイズに関しては、輝度差弁別閾に与える影響が、低い輝度に順応している時には大きく、高輝度に順応している時には小さいというように、順応レベルに応じてその影響が異なり¹⁴⁾、輝度差弁別閾に対する係数を求めるプロセスは複雑である。前述の Blackwell や Adrian の VL 算出モデルでも、このサイズの影響を式に反映させているが、式からの VL 算出プロセスが複雑であり、式の形では、照明設計をする上で実用上扱いにくい。またこれらモデル式は、様々な条件を包括した近似式であるため、屋内照明の視作業に条件を限定する場合には、より精度の高いデータの提供が望まれる。

そこで今回著者は、輝度差弁別閾の算出にあたり、図1に示す中根らの等視力曲線¹⁴⁾を用いることにした。図1に示す各視力に対する曲線は、文献14)に掲載されている等視力曲線のグラフから読みとったものであり、左下から視力0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.2、1.5、2.0を得るために必要な輝度対比と背景輝度との関係を示している。視力は、弁別可能な視角サイズ (min) の逆数で表されるものであるから、横軸のコントラスト閾値 C_{min} を、下記(3)式にもとづき、背景輝度 L_b (cd/m²) を用いて輝度差弁別閾 ΔL_{min} に変換すれば、等視力曲線は各サイズ毎に求められた輝度差弁別閾曲線と扱うことができる。

$$\Delta L_{min} = L_b \cdot C_{min} \quad \dots\dots\dots (3)$$

図1 23才の観察者に対する等視力曲線¹⁴⁾
Fig. 1 Iso-visual acuity curves for a 23 years old person.

また、この等視力曲線は、対象の輝度が背景輝度よりも低い正対比指標に対して求められたものである。実際の視環境の見えの多くは、屋内照明の場合、読書作業に代表されるように、正対比を対象とするものがほとんどである。正対比指標を対象とした場合の等視力曲線は、逆対比を対象とした場合の等視力曲線とはその特性が異なっていることから¹⁵⁾、屋内照明設計を前提とした今回の検討においては、正対比指標を対象とした実験データを用いるのが適切である。さらにこの等視力曲線は、曲線を得るために採用した被験者の平均年齢も23才と、20代の視認特性を代表する輝度差弁別閾曲線と見なせることも好都合である。

また、この等視力曲線は調整法で求められたものであるため、対象の呈示時間は無限大と見なすことができる。呈示時間の輝度差弁別閾に与える影響は2秒以上では少ないこと¹²⁾、対象の呈示時間が1秒以下に設定されるような交通照明とは異なり¹³⁾、読み書きや事務作業等を対象とする屋内照明設計においては2秒以下の呈示時間に対するデータは特に必要ないと判断したことから、今回呈示時間に対する検討は行っていない。

5. 上昇係数 AF と K_a の設定

以上述べてきた通り、今回20代の輝度差弁別閾データとしては、図1に示す被験者の平均年齢23才の中根らの等視力曲線を用いることにした。よって、加齢に伴う上昇係数 AF と K_a は、23才に対する係数として扱うことにする。

まず、加齢に伴う輝度差弁別閾の上昇を示した AF は235名の被験者を用いて実験を行ない、年齢 A (才) と20才時の輝度差弁別閾を1とする輝度差弁別閾上昇係数 m との関係を定式化した下記 Blackwell の式を採用した¹⁶⁾。

$$\begin{aligned} A=20\sim42\text{の時} \quad m &= 1.000 + 0.00795 (A-20) \\ 42\sim64\text{の時} \quad &= 1.175 + 0.0289 (A-42) \\ 64\sim80\text{の時} \quad &= 1.811 + 0.1873 (A-64) \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

次に K_a に関しては、Vos が文献17)にまとめたように、多くの研究者から年齢別係数が報告されている。今回著者は、これら各研究者から報告されている年齢別等価光幕輝度の算出方法を検討して年齢 A (才) と等価光幕輝度算出定数 k との関係を定式化した下記(5)式に示す Adrian の式³⁾を採用した。

$$k = (0.0752A - 1.883)^2 + 9.2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで示されている k は、上記(5)式に示されるようにグレア光源に存在により生じる角膜照度 E_{gl} と、視線とグレア光源とのなす角 θ (deg) から等価光幕輝度 L_{eq} を求めるための定数である。

$$L_{eq} = k E_{gl} / \theta^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

以上述べてきた式(4)と式(5)から、23才に対する値を1として比をとり、各年齢別に AF と K_a を算出した結果を表1にまとめて示す。

表1 各年齢における AF と K_a
Table 1 Calculated values of AF and K_a in different ages.

Age	AF	K_a
23	1.00	1.00
30	1.05	1.01
40	1.13	1.14
50	1.37	1.38
60	1.66	1.75
70	2.87	2.24
80	4.70	2.85

6. 年齢別等視力曲線の作成

以上の検討から、照明設計をする上でより使いやすいように、年齢別等視力曲線の作成を試みる。

まず、式(2)と AF と K_a に基づき、各年齢 A に対する輝度差弁別閾 $\Delta L_{\min}(A)$ を算出した。今回、23才の眼の視野に生じる等価光幕輝度は、視線と任意の部分とのなす角 θ (rad) に対する周辺視野の任意の部分の輝度 $L(\theta, \phi)$ から等価光幕輝度を求める下記(7)式¹⁸⁾を用いて算出した。

$$L_{eq} = \frac{9.6 \times 10^{-3}}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_{0.0131}^{1.0} \frac{L(\theta, \phi) \sin \theta \cos \theta}{\theta^2} d\theta d\phi \dots\dots\dots(7)$$

この式で、中根らの等視力曲線を得た実験で採用された視野は横160×縦90 (deg) の均一な輝度の視野であるが、輝度 L を有するこの均一視野に対する等価光幕輝度の計算値は $0.08L$ である。従って今回、中根らの等視力曲線を求めた実験条件において、平均年齢23才の被験者の背景輝度 L_b (cd/m²) の視野に対して生じた等価光幕輝度は全て、 $0.08L_b$ (cd/m²) として扱うことにした。

また今回、式(2)の23才の眼における輝度差弁別閾 $\Delta L_{\min, \gamma}$ には、中根らの等視力曲線を用いることにしたが、以上述べてきたように中根らの等視力曲線は、背景輝度 L_b に加えて、 $0.08L_b$ (cd/m²) の等価光幕輝度が重畳した状態の眼に対して得られたことに注意しなければならない。

以上の検討から、 $\Delta L_{\min, \gamma}$ に中根らの等視力曲線を用いた場合、式(2)は以下の式(8)のように書きかえることができる。

$$\Delta L_{\min}(A) = AF(A) \cdot L_{\min, \gamma} [L_b + \{K_a(A) - 1\} \cdot 0.08L_b] \dots\dots(8)$$

そして、ここで得られた輝度差弁別閾 $\Delta L_{\min}(A)$ は、等価光幕輝度 L_{eq} が重畳した被験者の眼を通した時の対象 L_t と背景 L_b の輝度差であるが、次式に示すように、その輝度差は輝度計などを通して測定される被験者の眼を通さない実際の輝度差でもある。

$$\Delta L_{\min}(A) = (L_b + L_{eq}) - (L_t + L_{eq}) = L_b - L_t \dots\dots\dots(9)$$

よって、次式に示すように、この $\Delta L_{\min}(A)$ を背景の輝度(被験者の眼を通さない) L_b で割れば、その値は、輝度計などで測定される実際の輝度対比に対する閾値 $C_{\min}$ ということになる。

$$C_{\min} = \Delta L_{\min}(A) / L_b \dots\dots\dots(10)$$

図2は、以上述べてきた検討結果の一例であり、70才に対して求めた各視力を得るために必要な指標と背景間の輝度対比と背景輝度との関係を表した等視力曲線を示している。

図2 70才の観察者に対する等視力曲線
Fig.2 Iso-visual acuity curves for 70 years old person.

7. 読書作業における照度と読みやすさとの関係の検討

以上の検討により対象年齢に対して求めた等視力曲線は、その妥当性を検証するためにも、実際の視環境において行われた実験データとの対応関係を明らかにする必要がある。ここでは、読書作業に対する適正照度を明らかにする目的で行われた Inoue らの実験結果¹⁹⁾と著者の求めた年齢別等視力曲線との対応関係を検討してみた。Inoue らの実験では、充分大きな均一背景上に文字指標を置いて評価実験を行っているため、著者の求めた年齢別等視力曲線をそのまま適用できる。

Inoue らは、読書作業を想定した実験条件下で、3, 30, 200, 800, 1500, 5000 (lx) の紙面上の各照度に対し、「読みやすさ」と「紙面に対する明るさ感」の2種類の評価尺度にもとづき若齢者(平均23才)と高齢者(平均70才)に対して心理評価を行った。「読みやすさ」は、文字の認識、すなわち輝度差弁別閾に関連する評価尺度であることから、ここでは「読みやすさ」に対する実験結果に対し検討を行う。

図3は、Inoue らが行った実験結果の一部であり、対比0.93で視角20～27分のサイズ(観察者の観察距離により異なる。視距離40 cmで8ポイント文字に相当)の文字に対して得られた実験結果を、文献19)から読みとって示したものである。図3に示すプロット点は、実験で用いられた評価尺度「読めない」、「やっと読める」、「多少読みにくい」、「普通に読める」、「読みやすい」、「非常に読みやすい」のうち、「普通に読める」以上の評価(「読みやすい」と「非常に読みやすい」を含む)の累積確率を示している。そして、著者のほうで、若齢者と高齢者の結果のそれぞれに対し、累積正規確率分布にもとづく回帰曲線をひき、「普通に読める」以上の累積確率が50%となる照度 E (lx) を読みとった。そして、背景を構成している紙面が完全拡散面に近いことから、下記式にもとづき背景輝度 L_b (cd/m²) に変換した。ここで、紙面の反射率 ρ は実験で用いられた反射率0.89である。

$$L_b = \rho E / \pi \dots\dots\dots(11)$$

以上の手順で、若齢者と高齢者のそれぞれに対して得られた「普通に読める」以上の評価の累積確率50%となる2点の背景輝度(以後、実験値と呼ぶ)と、図1ならびに図2の等視力曲線から得られた対比0.93のランドルト環指標に対する閾値(以後、推定値)との関係を図4に示す。図中のシンボルの違いは視力の違いを示

図3 照度と「普通に読める」以上の評価となる累積確率との関係¹⁹⁾
Fig.3 Relationships between illuminance and accumulated probability of the readability ratio from "no problem" to "very easy".

図4 年齢別等視力曲線から求められた推定値と Inoue らの実験値との関係
Fig.4 Relationships between the calculated values by using Iso-visual acuity curves and the experimental results for reading in different ages.

しており、図中の点線上の値は、実験値と推定値が一致することを意味している。

図4は等視力曲線から得られた視力1.2のランドルト環指標の視認閾値が実験値とよく一致していることを示している（図中シンボル△）。また今回の検討では、若齢者と高齢者間の実験値の比に最も近い値を示したのは視力0.7に対する推定値である（シンボル●）。そして図4は、この視力0.7を得るための背景輝度の8倍の値が実験値とよく一致していることを示している（シンボル+）。

これらの結果は、対比0.93の8ポイントの文字の文章に対し50%の人が普通に読めるための背景輝度は、著者の作成した年齢別等視力曲線を用いることにより、(1)視力1.2を得るために必要な背景輝度、または、(2)視力0.7を得るために必要な背景輝度の8倍のどちらかで算出することができる可能性を示している。これを前述の $VEL^{(9)}$ および $VL^{(12)}$ で評価すると、(1)の場合は、視力1.2の視認閾値に対し $VEL = 1$ 、 $VL = 1$ であり、(2)の場合には、視力0.7の視認閾値に対し $VEL = 8$ 、 $VL = 2.2$ ということになる。

しかし、データ数がまだ少ないため、読書作業に対する視認性評価を、上記(1)と(2)の方法のうち、どちらの方法を採用して行うべきかという議論や、作成した年齢別等視力曲線の妥当性の検証に関しては、図4に示す検討だけで結論を出すのは尚早であると考え。また今回の検討では、上記(1)と(2)の方法で示された1.2と0.7の2種類の視力と、それらに対する VEL または VL との組み合わせにのみ検討を行ったが、実際には他にも様々な組み合わせが存在する。視認性評価の前提条件として、閾値を算出する対象となる指標サイズ、すなわち視力をいくつに設定し、照明設計を

する際の目標値となる VEL または VL をいくつにすべきかということは、今回の検討に留めることなく、他の様々な実験データをもとに検討し、明らかにしていく必要があるであろう。

今後は、他の実験データに対しても同様の比較検討を行い、著者の作成した年齢別等視力曲線をもとに、加齢の影響を加味した視認性評価方法を確立していきたい。

8. 結言

Blackwell と Adrian が提案した加齢の影響を加味した Visibility Level 算出モデルをもとに、若齢者の輝度差弁別閾に中根らの等視力曲線を導入し、視認性評価を目的とした年齢別等視力曲線を作成した。この等視力曲線は、高齢者対応の屋内照明設計技術を開発するための有効なツールになると考える。

今後は、今回作成した等視力曲線の妥当性の検証と、その等視力曲線を照明設計へ展開していくための方法を引き続き検討していく予定である。

本研究を進めるにあたり、奈良女子大学の井上容子助教授には有益な助言をしていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 大島正光：「老化と生理機能」，医学のあゆみ，97-9，pp.659-660 (1976)。
- (2) CIE：“An Analytic Model for Describing the Influence of Lighting Parameters upon Visual Performance”，Publication No.19/2.1 (1981)。
- (3) W. Adrian：“Visibility of Targets：Model for Calculation”，Light. Res. Technol.，21-4，pp.181-188 (1989)。
- (4) 田淵義彦：「CRT ディスプレイの表示文字の好ましい輝度比のビジビリティレベル」，照学誌，81-8A，pp.700-702 (1997)。
- (5) W. Iwai and T. Sakaguchi：“Brightness of Self-luminous Delineators in Different Colors”，J. Illum. Engng. Soc.，27-1，pp.49-52 (1997)。
- (6) K. Narisada, T. Saito, Y. Karasawa：“Perception and Road Lighting Design”，Proceeding of SANCI，pp.83-86 (1996)。
- (7) W. Adrian：“Visibility Level in Street Lighting：An Analysis of Different Experiments”，J. Illum. Engng. Soc.，22-2，pp.49-52 (1993)。
- (8) W. Adrian and R. Gibbons：“Fields of Visibility of the Nighttime Driver”，Progress in Automobile Lighting 97，pp.8-21 (1997)。
- (9) 佐藤隆二，伊藤克三，大野治代：「見やすさに基づく明視照明設計に関する研究 — 照明の評価指標としての見やすさレベル (VEL) の有用性」，照学誌，64-10，pp.541-548 (1980)。
- (10) 中根芳一：「読みやすさ評価に基づく質的照明設計法に関する研究」，照学誌，65-10，pp.534-540 (1981)。
- (11) CIE：“Tunnel Entrance Lighting-A Survey of Fundamentals for Determining the Luminance in the Threshold Zone”，Publication No.61 (1984)。
- (12) H. R. Blackwell and O. M. Blackwell：“Population data for 140 normal 20-30 year olds for use assessing some

- effects of lighting upon visual performance", J. Illum. Engng. Soc., 9-3, pp.158-174 (1980).
- (13) K. Narisada : "Perception under Road Lighting Conditions with Complex Surroundings", J. Light & Vis. Env., 19-2, pp.5-14 (1995).
- (14) 中根芳一, 伊藤克三 : 「明視照明のための標準等視力曲線に関する研究」, 建学論, 229, pp.101-109 (1975).
- (15) 岩田三千子, 西田尚代, 中根芳一 : 「逆対比指標の等視力曲線に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1013-1014 (1994).
- (16) O. M. Blackwell and H. R. Blackwell : "Individual responses to lighting parameters for a population of 235 observers of varying ages", J. Illum. Engng. Soc., 9-4, pp. 205-232 (1980).
- (17) J. J. Vos : "Disability Glare-A state of the art report", CIE J., 3-2, pp.39-53 (1984).
- (18) P. Moon and D. E. Spencer : Lighting Design, Addison

Wesley Co. (1947).

- (19) Y. Inoue and Y. Akizuki : "Influence of age and visual acuity on Readability and Brightness —The proper illuminance for reading (part1)—", Proceedings Lux Pacifica '97, A-55-60 (1997).

(受付日1998年8月6日/採録日1998年9月3日)

いわい わたる
岩井 渡 (正会員)

松下電工株式会社

昭和42年1月10日生まれ。平成3年3月千葉大学大学院工学研究科画像工学専攻修士課程修了, 同年4月松下電工(株)に入社, 現在照明 R&D センターで照明に関わる視覚心理と視認性の研究に従事。日本色彩学会, 日本視覚学会会員。