正対比文字で構成された文章に対する読みやすさ評価関数

正会員 岩 井 彌 (松下電工株式会社) 専門会員 岡 嶋 克 典 (横浜国立大学)

Visibility Index Functions for Positive Contrast Text

Member Wataru Iwai (Matsushita Electric Works, Ltd.)
and Fellow Member Katsunori Okajima (Yokohama National University)

ABSTRACT

In this paper, we propose Visibility Index Functions (*VIFs*), that enable evaluating and predicting the legibility of sentences quantitatively and conveniently. In light of nonlinearity attached to suprathreshold phenomena, we analyzed the data of the series of legibility evaluation experiments of Sato and Hara(1999), and constructed two formulations: $VIF_V(VL, A)$ and $VIF_{\Delta L}(\Delta L, L_b, A)$, as functions of Visibility Level VL , luminance difference ΔL [cd/m^2] between a visual target and its background, background luminance L_b [cd/m^2] and character size A [min]. We showed that both the *VIFs* can well describe both the experimental results of Sato and Hara and the legibility data derived by Inoue and Akizuki (1997) with no parameter change except low luminance conditions for background.

KEYWORDS: visibility, legibility, visibility index function, visibility level, suprathreshold, non-linear processing

1. 緒言

文章に対する読みやすさの評価は、商品の仕様や照明の設計方法へとつながる重要な評価項目の一つである。本研究では、この文章の読みやすさ評価を設計や仕様決めをする上で使いやすきように関数化し、その評価式によって様々な条件下における文章の読みやすさを定量的に予測できるようにすることを目的としている。

文章の読みやすさ評価を関数の形で示した報告はほとんどなく、JISの照度基準¹⁾の付表に記載されている河合・黒沢の式²⁾が、読みやすさの評価式として報告されているものの、式の導出で用いられた評価実験データ³⁾の対象としているのが文章ではなく文字単体であること、ならびに式の導出においては、大きさの知覚に恒常性があるとして文字の大きさを視角で整理統合していないことなどの問題があり、文章の読みやすさ評価にそのまま適用することはできないと考える。

文章の読みやすさは視認性の一側面として捉えることができる。視認性を定量的に扱った報告は数多くあり、その中で最も代表的なものは、Blackwell⁴⁾やAdrian⁵⁾が提案した VL (Visibility Level)である。 VL の概念は、視対象の輝度 L_t とその背景の輝度 L_b との輝度差 ΔL ($=|L_t - L_b|$)または輝度対比 C と、輝度差弁別閾 $\Delta L_{\min}$ または輝度対比弁別閾 C_{th} との比をとり、この値によって視認性を評価しようとするものである。輝度差弁別閾 $\Delta L_{\min}$ や輝度対比弁別閾 C_{th} はその算出式が定式化されている⁴⁾⁶⁾ことから、様々な条件下における視認性の評価を、 VL を使って定量的に取り扱える可能性がある。

視認性には大きく分けて、「見える－見えない」(弁別閾)や「読める－読めない」(可読閾)などと表現される閾レベルの視認性と、すでに見えて読めているが、それよりさらに上のレベルの「見えや

すい－見えにくい」や「読みやすき－読みにくい」と表現される閾上レベルの視認性の2種類があり、文章の読みやすさは閾上レベルの視認性である。一方、 VL は輝度対比弁別閾や輝度差弁別閾などの閾値に基づく評価方法ではあるが、現在は、閾レベルの視認性のみならず、閾上レベルの視認性に対しても適用されている評価方法である⁷⁾⁹⁾。文章の読みやすさ評価においても、評価関数の提示はされていないものの、閾値データに基づき読みやすさを定量的に取り扱うことを検討した報告がいくつか存在する¹⁰⁾¹²⁾。

視認性に関連の深い視覚特性であるコントラスト感度特性においては、閾値と閾上でその空間周波数特性が大きく異なっていることが知られている¹³⁾。従って、 VL に代表される閾値に基づく視認性評価方法をそのまま閾上レベルの視認性に対して線形的に適用するには注意が必要である。実際、原・佐藤は、 VL と同様に、閾値との比を持って文章の読みやすさを定量的に評価するためにはいくつかの解決すべき課題があることを報告している¹⁴⁾。

コントラスト感度特性における閾レベルと閾上レベルの特性の違いは、視覚系の入出力特性が非線形であることに起因している¹⁵⁾。閾上レベルにおけるコントラスト感度に対するWilsonのモデル¹⁶⁾は、特定の周波数に対して選択的に応答する各チャンネルにおいてそれぞれ非線形な変換が行われていることを示している。これらの報告は、文章の読みやすさなどの閾上レベルの視認性を定量的に扱うためには、閾上レベルの視覚特性の特徴である非線形性を加味する必要があることを示唆するものである。

以上のことから本論文では、文章の読みやすさを閾上レベルの視認性の一側面として捉え、以上述べてきた閾上レベルの視認性

本論文の一部は平成13年度照明学会全国大会で岩井彌が講演した。

を定量的に取り扱う上で重要視しなければならない非線形性を考慮して、文章の読みやすさ評価関数を導出し、その妥当性についての検討を行った。

また、ON 中心型細胞などの輝度差の情報を処理するプロセスが、視覚系の初期段階である網膜に存在していることはよく知られている¹⁷⁾。文章の読みやすさなどの定常的な視認性を支配する主要因と知られる明視三要素は、文字サイズ（視角）、背景輝度、輝度対比であることが知られているが¹⁸⁾、輝度差は輝度対比と背景輝度から計算できる（輝度差＝輝度対比×背景輝度）。したがって、文字サイズ・背景輝度・輝度対比に替えて、文字サイズ・背景輝度・輝度差の組合せで文章の読みやすさを表現することも可能である。そこで本論文では、非線形性に注目した検討に加え、輝度差に注目した検討も試みたので、以下に報告する。

2. 文章の読みやすさに対する評価実験データ

先にも述べたように、文章の読みやすさは一般に明視三要素（文字サイズ、背景輝度、輝度対比）の組合せで規定されている。従って、本研究の目的である文章の読みやすさ評価関数の導出にも、これら明視三要素と文章の読みやすさ評価値との対応関係を明らかにした評価実験のデータを用いる。

佐藤・原は、輝度が一様な視野の視線 1(m)先に平易な日本語を視対象として呈示し、文章の読みやすさの評価をさせる実験を行った¹⁸⁾。実験では、表 1 に示す文字サイズ 6 水準、輝度対比 5 水準、背景輝度 5 水準の計 150 種類の実験条件に対して読みやすさ評価実験を行っている。この評価実験で被験者は、設定された実験条件で呈示された文章に対して、「読めない」、「やっと読める」、「多少読みにくいが読める」、「苦勞せずに読める」、「読みやすい」、「非常に読みやすい」の 6 段階の評価カテゴリーに基づき読みやすさを評価した。被験者は大学生 10 名であり、平均年齢は 23 才である。原・佐藤は、以上の実験結果から得た読みやすさ評価データの相対累積度数分布を基に、各パーセントに対応する読みやすさ評価を、6 段階の評価カテゴリーの境界にそれぞれ 1 から 5 の整数値を与えた目盛りで読み取ることで読みやすさ評価を数値化している¹⁹⁾。表 2 はそれら数値化されたデータであり、背景輝度と文字サイズとの組合せに対する読みやすさ評価の 50 パーセンタイル値（以下、50 パーセンタイル値と記す）を示したものである。図 1 に、50 パーセンタイル値と評価カテゴリーとの関係を示す。

以上述べた佐藤・原の実験の目的は、平面的な視対象に対して視作業の行われるあらゆる場面に対応した視環境設計の基礎となるデータの提供であることから、実験条件として文章を読むことが想定される視環境が幅広く網羅されている。したがって、この評価実験から得られた実験データを精度良く記述できる評価関数を定式化することができれば、その関数は、適用範囲の広い文章の読みやすさ評価関数となることが期待できる。そこで、表 2 に示された 50 パーセンタイル値を従属変数とし、対応する明視三要素の文字サイズ、背景輝度、輝度対比の値を独立変数として、文章の読みやすさ評価関数 VIF (Visibility Index Function) の導出を試みた。

表 1 佐藤・原の実験¹⁸⁾での実験条件

Table 1 The experimental conditions in the Sato&Hara's experiment.

文字サイズ(分)	7.2, 10.9, 16.9, 25.3, 38.6, 57.9
輝度対比	0.2, 0.29, 0.49, 0.73, 0.92
背景輝度 (cd/m ²)	15, 50, 200, 600, 1500

表 2 背景輝度と文字サイズとの組合せに対する 50 パーセンタイル値¹⁹⁾
Table 2 50 percentile of Readability evaluation value to the combination of background luminance and character.

文字サイズ (分)	輝度対比	背景輝度(cd/m ²)				
		15	50	200	600	1500
7.2	0.20	0.50	0.50	0.50	0.51	0.51
	0.29	0.50	0.50	0.50	0.58	0.67
	0.49	0.50	0.55	0.74	0.94	1.08
	0.73	0.53	0.67	0.94	1.19	1.38
	0.92	0.56	0.86	1.18	1.42	1.60
10.9	0.20	0.50	0.50	0.72	0.95	1.06
	0.29	0.60	0.83	1.20	1.47	1.58
	0.49	0.97	1.49	1.94	2.20	2.31
	0.73	1.47	1.93	2.26	2.53	2.67
	0.92	1.78	2.11	2.46	2.64	2.75
16.9	0.20	1.07	1.66	1.94	2.20	2.20
	0.29	1.60	2.11	2.55	2.78	2.72
	0.49	2.40	2.91	3.25	3.45	3.56
	0.73	2.91	3.32	3.62	3.80	3.93
	0.92	3.14	3.57	3.80	4.00	4.09
25.3	0.20	2.00	2.48	2.91	3.16	3.15
	0.29	2.50	3.06	3.42	3.64	3.56
	0.49	3.36	3.74	4.05	4.28	4.27
	0.73	3.85	4.17	4.45	4.67	4.75
	0.92	4.18	4.52	4.72	4.93	5.04
38.6	0.20	2.85	3.36	3.80	4.07	4.00
	0.29	3.27	3.77	4.17	4.40	4.35
	0.49	4.03	4.38	4.73	4.90	4.88
	0.73	4.53	4.86	5.08	5.20	5.23
	0.92	5.00	5.27	5.42	5.49	5.50
57.9	0.20	3.82	4.29	4.68	4.98	4.86
	0.29	4.18	4.63	5.10	5.28	5.23
	0.49	4.74	5.08	5.34	5.47	5.47
	0.73	5.24	5.42	5.49	5.50	5.50
	0.92	5.45	5.50	5.50	5.50	5.50

6	非常に読みやすい
5	読みやすい
4	苦勞せずに読める
3	多少読みにくいが読める
2	やっと読める
1	読めない
0	

図 1 50 パーセンタイル値と評価カテゴリーとの関係¹⁹⁾

Fig.1 Relationship between the psychological evaluation value and the evaluation category.

3. 非線形関数を導入した評価関数の導出

先にも述べたように、視認性の定量化手法としてよく知られているのは、Blackwell⁴⁾やAdrian⁵⁾が提案した次式で示される V_L に基づく視認性評価方法である。

$$V_L = \frac{\Delta L}{\Delta L_{\min}} \dots \dots \dots (1)$$

$$V_L = \frac{C}{C_{th}} = \frac{\Delta L}{L_0} \bigg/ \frac{\Delta L_{\min}}{L_0} = \frac{\Delta L}{\Delta L_{\min}} \dots \dots \dots (2)$$

VZ そのものは閾レベルの視認性を対象とした評価関数であるが、今回はまず閾上レベルの視覚特性である非線形性に注目し、VZに非線形関数を導入して閾上レベルの視認性評価関数を導出できるかを検討した。

まずは、佐藤・原の実験で得られたデータ（以下、佐藤・原のデータと呼ぶ）で示されている実験条件の背景輝度 L_b と輝度対比 C とから、下記の式(3)を用いて VZ を算出した。ここで輝度対比弁別閾 C_{th} は、CIE の技術報告書⁴⁾ に記述されている輝度対比弁別閾の算式を用いた。

$$VZ = C/C_{th} = C \times \frac{1.555 \times \left[(1.639/L_b)^{0.4} + 1 \right]^{-2.5}}{0.0923} \dots\dots\dots (3)$$

視覚特性を表現する非線形関数としては、Weber - Fechner の法則を表現する対数関数、Stevens の式で知られるべき乗関数、そして、視細胞の出力関数として知られる式(4)に示される S 字関数がある²⁰⁾。

$$V = V_{max} \frac{I}{I + \alpha} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 V は出力の強度で V_{max} はその最大値、 I は入射光の強度、 α は曲線の形状を決めるパラメータである。

式(4)の S 字関数は、出力の上端と下端すなわち非常に暗いときと非常に明るいときを除いたほとんどの出力範囲で対数関数的な変化を示す。したがって今回は、式を簡略化する ($y=f(x)$ の関数 f を一つの x で表す) ため、非線形関数に對数関数とべき乗関数を用いて評価関数を導出する。

対数関数を適用した $\log_{10} VZ$ と 50 パーセンタイル値との関係のうち、文字サイズ 25.3(分)に対する結果を示したのが図 2 である。また図 3 には、べき乗関数を適用した $VZ^{1/3}$ と 50 パーセンタイル値との関係のうち、文字サイズ 25.3(分)に対する結果を示した。

図 2 $\log_{10} VZ$ と 50 パーセンタイル値との関係 (文字サイズ 25.3(分))
Fig.2 Relationship between the $\log_{10} VZ$ value and the 50 percentile of evaluation value (character size of 25.3(min)).

図 3 $VZ^{1/3}$ と 50 パーセンタイル値との関係 (文字サイズ 25.3(分))
Fig.3 Relationship between the $VZ^{1/3}$ value and the 50 percentile of evaluation value (character size of 25.3(min)).

図 2 と図 3 の結果は、VZ に非線形関数を導入した関数と文章の読みやすさ評価値である 50 パーセンタイル値との関係が良好な直線関係にあることを示しているが、図 2 に示される対数関数を導入した評価関数のほうが図 3 に示されるべき乗関数を導入した関数よりも直線性が高い (相関係数は図 2 の結果では 0.995、図 3 の結果では 0.984)。そして、この対数関数を用いることによる優位性は他の文字サイズに対しても同様に見られた。したがって以後は、非線形変換のために対数関数を用いて検討を進める。

図 4 は、 $\log_{10} VZ$ と 50 パーセンタイル値との関係を、佐藤・原のデータでの全文字サイズに対して示したものであり、全文字サイズにわたって、 $\log_{10} VZ$ と 50 パーセンタイル値との関係は良好な直線関係にあることを示している。今回の読みやすさ評価関数の導出に用いた表 2 に示されている 50 パーセンタイル値は、そのデータ整理の方法から 0.5~5.5 の範囲内にあり、より見にくい条件であっても 0.5 以下の値とはならず、逆により読みやすい条件となっても 5.5 より高い値とはならない。したがって、回帰直線の傾きの算出は、0.5 と 5.5 の値を含まない文字サイズである 16.9(分)と 25.3(分)のデータに対して行った。最小自乗法を用いて回帰直線を求めた結果、文字サイズ 16.9(分)と 25.3(分)に対する回帰直線の傾きはいずれも 3.0 であった。図 4 に示されている各回帰直線の傾きは以上の検討から得られた 3.0 である。

よって、50 パーセンタイル値 R を評価できる文章の読みやすさ評価関数 VIF_{VL} は、以下の式(5)のように表すことができる。

$$R = 3.0 \log_{10} VZ + k(A) \dots\dots\dots (5)$$

ここで $k(A)$ は文字サイズ A (分) の関数であるが、図 4 に示される回帰直線の切片そのものである。図 5 は、その回帰直線の切片と各文字サイズとの関係を示したものである。そして図 5 に示されている回帰直線の式が $k(A)$ となる。

したがって、式 (5) は最終的に次の式(6)のように記述することができる。

$$R = 3.0 \log_{10} VZ + 5.5 \log_{10} A - 6.2 \dots\dots\dots (6)$$

図4 全文字サイズに対する $\log_{10} VL$ と 50 パーセンタイル値との関係
Fig.4 Relationship between the $\log_{10} VL$ value and the 50 percentile of evaluation value for all character sizes.

図5 文字サイズと図4に示す回帰曲線の切片との関係
Fig.5 Relationship between the character size and the intercept of regression lines shown in Fig.4.

式(6)を用いて佐藤・原の全データに対して計算を行った結果を図6に示す。図6は、式(6)に示される視認性評価関数 VIF_{VL} による計算値と 50 パーセンタイル値との間に強い相関があることを示しており(相関係数 0.987), VL に非線形関数である対数関数を導入した式(6)に示した視認性評価関数 VIF_{VL} は、佐藤・原のデータを精度良く記述できることが示された。

図6 視認性評価関数 VIF_{VL} の計算値と 50 パーセンタイル値との関係
Fig.6 Relationship between the VIF_{VL} value and the 50 percentile of evaluation value.

4. 輝度差に基づく評価関数の導出

次に、非線形に加えて注目した輝度差に基づく視認性評価関数の導出可能性を検討した。

佐藤・原のデータで示されている実験条件の背景輝度 L_b と輝度対比 C とから、輝度差 $\Delta L (= C \times L_b)$ を算出した。閾上レベルの視覚特性は非線形性であることから、前節の VL に対する非線形関数の導入と同様、ここでも対数関数を用いて $\log_{10}(\Delta L + 1)$ を計算した。ここで対数関数の変数を $\Delta L + 1$ としたのは、 ΔL が 1 以下となった場合に、対数値が負にならないようにするためである。

さらに、順応を決める背景輝度 L_b の影響を関数に組み込む必要がある。背景輝度 L_b は、既往研究ではウェーバー比 ($\Delta L / L_b$) に代表されるように関数の分母に配されている報告がほとんどである。従って本論文でも L_b を分母に配することにした。 L_b の影響に関しても非線形性に注目し、 VL に対する検討時の時と同様、 L_b のべき乗関数と対数関数を分母に配して検討を行った。佐藤・原のデータのうち、文字サイズ 25.3(分)に対するデータから、 $\log_{10}(\Delta L + 1)$ を計算し、べき乗関数 $L_b^{1/3}$ で割ったものを図7に、そして、対数関数 $\log_{10} L_b$ で割ったものを図8にそれぞれ示す。さらに、同じ対数関数ではあるが、岡嶋・池田²¹⁾が、閾上レベルの視覚特性のひとつである色の見えのモードの変化を定量的に説明する状態方程式を定式化した際、背景輝度の影響を関数化するために導入した $\log_{10}(L_b + \beta)$ (β は実験条件によって決まる定数) で $\log_{10}(\Delta L + 1)$ を割った結果を図9に示す。今回 β は、佐藤・原のデータの全文字サイズにわたって計算した $\log_{10}(\Delta L + 1) / \log_{10}(L_b + \beta)$ の計算値と 50 パーセンタイル値との間の相関が最も高くなる $\beta = 4$ を用いた。

これらの結果のうち、50 パーセンタイル値と最も相関が高く良好な直線関係を示したのは、図9に示される $\log_{10}(\Delta L + 1) / \log_{10}(L_b + 4)$ であった。従って、以後の輝度差 ΔL と背景輝度 L_b の取り扱い、 $\log_{10}(\Delta L + 1) / \log_{10}(L_b + 4)$ で行うことにする。

図7 $\log_{10}(\Delta L + 1) / L_b^{1/3}$ と 50 パーセンタイル値との関係 (文字サイズ 25.3(分))

Fig.7 Relationship between the $\log_{10}(\Delta L + 1) / L_b^{1/3}$ value and the 50 percentile of evaluation value (character size of 25.3(min)).

図8 $\log_{10}(\Delta L+1)/\log_{10} L_b$ と 50 パーセンタイル値との関係 (文字サイズ 25.3(分))

Fig.8 Relationship between the $\log_{10}(\Delta L+1)/\log_{10} L_b$ value and the 50 percentile of evaluation value (character size of 25.3(min)).

図9 $\log_{10}(\Delta L+1)/\log_{10}(L_b+4)$ と 50 パーセンタイル値との関係 (文字サイズ 25.3(分))

Fig.9 Relationship between the $\log_{10}(\Delta L+1)/\log_{10}(L_b+4)$ value and the 50 percentile of evaluation value (character size of 25.3(min)).

図10は、 $\log_{10}(\Delta L+1)/\log_{10}(L_b+4)$ の計算を、佐藤・原のデータが対象とした全文字サイズに対して行った結果を示したものであり、全文字サイズにおいて、 $\log_{10}(\Delta L+1)/\log_{10}(L_b+4)$ の計算値と50パーセンタイル値はすべて直線関係で示されることを表している。図10に示されている各回帰直線の傾きは、式(6)に示した視認性価関数 VIF_{VL} の場合と同様、文字サイズ 16.9(分)と 25.3(分)のデータに対する回帰直線の傾きの平均から求めたものであり、すべて 5.5 である。そして、式(6)の関数を求めた時と同様に、図10の各直線の切片から文字サイズ A (分)の影響を関数化し、最終的に、50パーセンタイル値 R を評価できる文章の読みやすさ評価関数 $VIF_{\Delta L}$ を導出したのが次式(7)である。

$$R = 5.5 \frac{\log_{10}(\Delta L + 1)}{\log_{10}(L_b + 4)} + 5.5 \log_{10} A - 8.7 \dots \dots (7)$$

図10 全文字サイズに対する $\log_{10}(\Delta L+1)/\log_{10}(L_b+4)$ と 50 パーセンタイル値との関係

Fig.10 Relationship between the $\log_{10}(\Delta L+1)/\log_{10}(L_b+4)$ value and the 50 percentile of evaluation value for all character sizes.

この式(7)を用いて、佐藤・原の全データに対して計算を行った結果と50パーセンタイル値との関係を図11に示す。図11は、計算値と50パーセンタイル値との間に強い相関関係があることを示しており (相関係数 0.982)、 V_L に非線形関数を導入した式(6)に示される視認性価関数 VIF_{VL} と同様、輝度差に非線形関数を導入した式(7)に示される $VIF_{\Delta L}$ も、佐藤・原のデータを精度良く記述できる関数であることが示された。

図11 視認性評価関数 $VIF_{\Delta L}$ の計算値と 50 パーセンタイル値との関係
Fig.11 Relationship between the $VIF_{\Delta L}$ value and the 50 percentile of evaluation value.

5. 考察

5.1 Inoue&Akizuki のデータに対する関数適用性の検討

佐藤・原の文章の読みやすさ評価データを精度良く記述できる読みやすさ評価関数として、式(6)に示される VIF_{VL} と、式(7)に示される $VIF_{\Delta L}$ を導出することができた。次に、これら導出した関数の文章の読みやすさ評価関数としての更なる妥当性を示すために、佐藤・原の研究報告¹⁸⁾と同様に様々な条件に対して「文

章の読みやすさ」を評価する実験を行った Inoue&Akizuki²²⁾の実験結果(以下、Inoue&Akizukiのデータ)に対しても、式(6)と式(7)に示される関数が適用できるかを検討した。

Inoue&Akizuki は、読書作業を想定した実験条件のもとで、B5サイズの紙面に印刷された日本語の文章を 40(cm)前後の観察距離に呈示して、若年者(平均 23 才)と高齢者(平均 70 才)に対して読みやすさ評価をさせる実験を行った。佐藤・原のデータは、若年者被験者を対象に実験を行った結果得られたものであることから、式(6)と式(7)の関数は若年者に対する関数である。従って、以後の分析は、Inoue&Akizuki のデータのうち、若年者に対するデータのみを用いた。Inoue&Akizuki のデータの一部(輝度対比 0.93)を図 12 に示す。

図 12 は、実験で用いた 6 段階の評価尺度である「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」の各評価語のうち、「普通に読める」以上(「普通の読める」～「非常に読みやすい」)の評価となる累積確率 50(%)を得ることのできる照度と文字サイズとの関係を示している。そして、図 12 に示されているグラフから、16 段階の照度 E (lx) (1,2,3,5,7,10,20,30,50,70,100,200,300,500,700,1000) に対応する文字サイズ A (分)を読みとった。

図 12 「普通に読める」以上の評価となる累積確率 50(%)を得ることのできる照度と文字サイズとの関係²²⁾(輝度対比 0.93)。

Fig.12 Relationship between the illuminance and the character size for accumulated probability 50(%) of the legibility ratio from “no problem” to “very easy”(luminance contrast of 0.93).

背景輝度 L_b (cd/m²)は、実験での視対象の文字の背景を構成している紙面の反射率 0.89 と照度 E (lx)とから求め ($L_b = E \times 0.89 / \pi$)、輝度差 ΔL は、固定された実験条件である輝度対比 0.93 並びに背景輝度 L_b (cd/m²)とから求めた ($\Delta L = L_b \times 0.93$)。以上の手順で得た背景輝度 L_b (cd/m²)、輝度差 ΔL 、文字サイズ A (分)は、同じ読みやすさ評価となるパラメータの組み合わせとなるので、ここで導出した関数が文章の読みやすさを評価できる視認性関数として妥当であれば、その計算値は文字サイズ、背景輝度によらず一定の値を示すことになる。式(6)と式(7)の関数に対する計算値をそれぞれ背景輝度毎に示したのが図 13 と図 14 である。それぞれの関数による計算値は、異なる背景輝度と文字サイズの組み合わせに対して得られた結果にも関わらず、10(cd/m²)以上の背景輝度に限れば、ほぼ一定の値を示している。したがって、この背景輝度の範囲に限定すれば、今回導出した関数は文章の読みやすさを評価できる視認性評価関数として妥当であることが、Inoue&Akizuki のデータからも示された。

この 10(cd/m²)以上という輝度範囲は、紙面の反射率が 80(%)前後だとすると 50(lx)以上の照度レベルの範囲に相当する。従って、実際の照明設計や商品開発への適用を考えれば、この輝度範囲内で文章の読みやすさの評価ができれば実用上十分であると考ええる。

図 13 Inoue&Akizuki²²⁾の実験データに対する VIF_L の計算値
Fig.13 The VIF_L value calculated by the data of Inoue&Akizuki's experiment.

図 14 Inoue&Akizuki²²⁾の実験データに対する $VIF_{\Delta L}$ の計算値
Fig.14 The $VIF_{\Delta L}$ value calculated by the data of Inoue&Akizuki's experiment.

図 13 と図 14 内の水平点線は、10 (cd/m²)以上のデータに対する平均値をその値と共に示したものであるが、今回検討した累積確率 50 (%)の読みやすさレベルに対する平均値は、図 13 の VIF_L では 3.9 であり、図 14 の $VIF_{\Delta L}$ では 3.8 である。佐藤・原¹⁹⁾の実験では図 1 に示したように、数値 3 と 4 の間の評価カテゴリーは、「苦勞せずに読める」である。尺度の順序で見れば、Inoue&Akizuki の実験での評価カテゴリー「普通に読める」は、佐藤・原の実験の評価カテゴリー「苦勞せずに読める」に相当する。したがって、「普通に読める」以上の評価となる累積確率 50 (%)の読みやすさレベルに対する視認性評価関数の計算値が、「苦勞せずに読める」のカテゴリーに入っていることもまた、今回導出した 2 つの評価関数の文章の読みやすさ評価関数としての妥当性が高いことを示している。

5.2 視認性評価関数 VIF_L における弁別関設定の影響

式(6)の導出から分かるように、 V_L に非線形性を導入することによって文章の読みやすさ評価関数の導出が可能であることが分かった。

しかし V_L には、輝度差弁別閾 $\Delta L_{\min}$ または、輝度対比弁別閾 C_{th} の設定によってその値が変化するという問題がある。図 15 は、図 4 と同様に $\log_{10} V_L$ と 50 パーセント値との関係を示したものであるが、計算には式(3)で用いられている輝度対比弁別閾ではなく、中根・伊藤の等視力曲線²³⁾に示されている視力 0.1 のランドルト環視標に対する輝度対比弁別閾を用いている。

図 4 と図 15 の結果を比較すると、プロット点の $\log_{10} V_L$ の値が異なっていることが分かる。図中に示されている回帰直線の傾きも若干変化しており、図 4 の傾き 3 に対して図 15 では 2.8 となっている。すなわち、用いる輝度対比弁別閾により視認性評価関数の形が変化している。輝度差弁別閾や輝度対比弁別閾などの弁別閾は、背景輝度のみならず、サイズ、形状、呈示時間などの他の様々な条件により変化する⁴⁾。道路照明設計へと展開される路上落下物の視認性の研究²⁴⁾では、 $V_L > 1$ となる条件を明確にすることを目的としているために、用いる弁別閾が実際の路上落下物を視認する時の観察条件を忠実に再現しているかどうか最も重要な課題となっている。従って本来なら、関数の導出に用いられる弁別閾には、文書の読みやすさの観察条件を忠実に再現した弁別閾を用いるべきであるが、その選定は非常に困難であり、その選定方法の明確化が今後の課題であると考えられる。

図 15 全文字サイズに対する $\log_{10} V_L$ と 50 パーセント値との関係。ただし、 V_L の計算には中根・伊藤の等視力曲線²³⁾に示されている視力 0.1 のランドルト環視標に対する輝度差弁別閾を用いた。

Fig.15 Relationship between the $\log_{10} V_L$ value and the 50 percentile of evaluation value for all character sizes. But, luminance difference thresholds of visual acuity 0.1 was used for calculation of V_L .

5.3 今後の検討課題

今回用いた佐藤・原のデータと Inoue&Akizuki のデータは共に、対象は若年者であり（平均年齢 23 才）、今回導出した評価関数は若年者に適用できる関数である。従って、今回導出した関数を、視認性において加齢の影響が顕著に出てくる 40 歳以上²⁵⁾ に対しても使える関数とするためには、さらなる検討が必要であろう。加齢の影響は主として眼球光学系における調節能力の低下²⁶⁾と網膜へ達する光量の低下²⁷⁾に現れる。調節能力の低下は網膜上での実際の輝度差の低下であり、網膜へ達する光量の低下は背景輝度の低下である。今回導出した関数は、輝度差と背景輝度を変数とすることから、加齢の影響は比較的容易に今回の関数に組み込める可能性がある。

また、今回導出した評価関数では、文字サイズ A の影響を表す関数 $k(A)$ (式(6)の場合は $k(A)=5.5\log_{10}(A)-6.2$ 、式(7)の場合は $k(A)=5.5\log_{10}(A)-8.7$) は、視覚系のモデルを仮定して定式化した輝度差（または輝度対比）と背景輝度とを変数とする第一項とは異なり、図 5 に示すように、佐藤・原のデータに精度良く当てはまるように求めたものである。野口ら²⁸⁾は、眼球内散乱光の影響により視対象の輝度分布情報が網膜上に到達する時には変化することから、網膜上における実際の輝度分布情報である実効輝度の分布の推定法を開発した。そして、実効輝度の分布の推定により視対象の様々な形状、様々な文字サイズの変化に伴う輝度差弁別閾の変化が説明できることを実験的に示した²⁹⁾。すなわち、文字サイズの変化に伴い輝度差弁別閾が変化するのはなく、実効輝度分布が変化するということを、野口らは実験データから理論的に導いた。この理論から、文字サイズの影響を示した関数 $k(A)$ を、視覚系のモデルに基づいて導き出せる可能性があるが、これは今後の検討課題としたい。

本報では、佐藤・原のデータが示す 50 パーセント値は間隔尺度であることが保障されていないところを間隔尺度として文章の読みやすさ評価関数を導出した。したがって現段階では、評価関数の計算値に対しては、どの評価カテゴリーに属しているのかという意味（例えば、計算値が 1.7 であれば「やっと読める」と評価される）のみで解釈するのが望ましいと考える。一方で、今回導出した評価関数の計算値が示す尺度の定量的な等間隔性の確認や検討も今後必要であろう。

6. 結言

文章の読みやすさを閾上レベルの視認性の一側面として捉え、閾上レベルの視認性を定量的に取り扱う上で重要視しなければならない非線形性と輝度差に基づいた情報処理プロセスを考慮し、明視三要素に基づく視対象と背景との輝度差 ΔL 、背景輝度 L_b (cd/m^2)、文字の文字サイズ A (分)を変数とする式(6)と式(7)にそれぞれ示した視認性評価関数 VIF_L と $VIF_{\Delta L}$ を導出した。

これらの関数による計算値は、佐藤・原の読みやすさ評価実験の結果を精度良く記述できた。また、10 (cd/m^2) 以上の範囲に限定すれば、この関数の文章の読みやすさ評価関数としての妥当性は Inoue&Akizuki のデータに対しても示された。これらの関数には、低輝度領域への拡張や加齢の影響、そして尺度の問題などの他にも、今回検討した正対比文章（文字の輝度が背景輝度よりも低い）とは逆の逆対比文章への適用や、文章以外の視対象への適用など、今後明らかにしていかなければならない課題は数多く存在する。他の様々な視認性評価データに対して、今回導出した評価関数の妥当性の検証と、必要に応じた評価式の改良を今後試みていく予定である。

本研究を進めるにあたり、大阪工業大学佐藤隆二先生、関西大学原直也先生、ならびに奈良女子大学井上容子先生と秋月有紀博士（当時、現在は立命館大学）から、多くのご助言、ご助力をいただきました。また、1999 年 4 月から 2002 年 3 月まで活動しておりました照明学会「視認性に関する研究調査委員会」の委員の方々にも、貴重なコメントをいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- (1) JIS Z9110, 照度基準, 日本規格協会 (1979).
- (2) 河合 悟, 黒沢涼之助: 照度と読みやすさとの関係を表わす簡単な実験式, 照学誌, 57-9, pp.580-583 (1973).
- (3) 印東太郎, 河合 悟: 適正照度に関する心理学的実験, 照学誌, 49-2, pp.52-63 (1965).
- (4) CIE Publication No.19/2.1 and No.19/2.2, An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance(1981).
- (5) W. Adrian : Visibility of Targets : Model for Calculation, Ligh. Res. Technol., 21-4, pp.181-188(1989).
- (6) 道路照明のビジビリティレベルに関する研究調査委員会報告書, 照明学会, JIER-072 (2002).
- (7) W. Adrian and R. Gibbons : Fields of Visibility of the Nighttimer Driver, Progress in Automobile Lighting 97, pp.8-21(1997).
- (8) W. Iwai and T. Sakaguchi : Brightness of Self-luminous Delineators in Different Colors, J. Illum. Engng. Soc., 27-1, pp.49-52(1997).
- (9) 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).
- (10) 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).
- (11) 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).
- (12) 秋月有紀, 井上容子: 個人の最大視力に対する視力比の概念の導入 - 個人の視力に配慮した視認能力評価における背景輝度と視距離の影響の取り扱いについて -, 照学誌, 86-11, pp.819-829 (2002).
- (13) H. R. Wilson : A transducer function for threshold and suprathreshold human vision, Biological Cybernetics, 38, pp.171-178(1980).
- (14) 原 直也, 佐藤隆二: 「文章の読みやすさと見やすさレベルとの関係」, 照学全大, pp.170-171 (2002).
- (15) A. B. Watson and J. A. Solmon : Model of visual contrast gain control and pattern masking, J. Opt. Soc. Am, A14, pp.2379-2391(1997).
- (16) M. A. Georgeson and G. D. Sullivan : Contrast Constancy : Deblurring in Human Vision by Spatial Frequency Channels, J. Physiology, 252, pp.627-656 (1975).
- (17) D. Marr and E. Hildreth : Theory of edge detection, Proceedings of the Royal Society of London, B, 207, pp.187-217 (1980).
- (18) 佐藤隆二, 原 直也: 明視三要素で構成される3次元空間における種々の見やすさレベルを表す曲面, 照学全大, pp.130-131 (1999).
- (19) 原 直也: 視覚情報機器併用時の見やすさに基づく室の視環境設計に関する研究, 大阪大学博士論文 (1999).
- (20) J. M. Valetton and D. Norren : Light adaptation of primate cones: An analysis based on extracellular data, Vision Res., 23, pp.1539-1547(1983).
- (21) 岡嶋克典, 池田光男: 白色光における輝面色モードと表面色モードの見えの定式化, 光学, 18, pp.558-564 (1989).
- (22) 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).
- (23) 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).
- (24) K. Narisada, T. Saito and Y. Karasawa : Perception and Road Lighting Design, Proceeding of SANCI, pp.83-86(1996).
- (25) 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).
- (26) J. F. Sturr, G. E. Kline and H. R. Taub : Performance of young and older drivers on a static acuity test under photopic and mesopic luminance conditions, Human Factors, 32, pp.1-8(1990).
- (27) 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, 照学誌, 83, pp.556-560 (1999).
- (28) 野口太郎, 大月容子, 伊藤克三: 実効対比を用いた視認能力の把握, 建学論, 326, pp.111-116 (1983).
- (29) 野口太郎, 大月容子, 伊藤克三: 各種指標への実効輝度適用による等視力曲線の検討, 建学論, 346, pp.124-131 (1984).

(受付日 2003 年 7 月 4 日 / 採録日 2004 年 7 月 30 日)

岩井 彌 (正会員)

松下電工株式会社

〒571-8686 大阪府門真市大字門真 1048

1967 年生まれ。1991 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 月松下電工株式会社に入社。現在、照明事業分社中央照明エンジニアリング総合部照明ソフト開発グループにて照明に関わる視覚心理と視認性の研究に従事。日本照明委員会、日本色彩学会、日本視覚学会各会員。

岡嶋 克典 (専門会員)

横浜国立大学大学院環境情報研究院

〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-7

1962 年生まれ。1990 年 3 月東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻博士課程修了。同年 4 月防衛大学校に勤務。現在、横浜国立大学大学院環境情報研究院において視覚認知機構、加齢工学、バーチャルリアリティ等の研究に従事。映像情報メディア学会、日本色彩学会、日本視覚学会、日本バーチャルリアリティ学会、日本照明委員会等各会員。