視野全域での高輝度面による順応輝度増加量の加法性の検討

－実効輝度関数 $F(\theta)$ の定量方法に関する検討（その2）－CONSIDERATION ON ADDITIVITY OF ADAPTATION LUMINANCE INCREASE
BY HIGH LUMINANCE SURFACES IN ALLOVER VISUAL FIELD－Study on measurements of effective luminance function $F(\theta)$ Part 2－池上 陽子^{*1}, 原 直也^{*2}, 井上 容子^{*3}

Yoko IKEGAMI, Naoya HARA and Youko INOUE

For designing a comfortable visual environment, it is necessary to estimate adaptation luminance of the whole visual field with complicated luminance distribution. It is thought that such adaptation luminance is estimated by considering the summation of the adaptation luminance increase that is the effective luminance brought by a partial luminance of visual fields. For estimating the adaptation luminance, the additivity of adaptation luminance increase should be confirmed to the whole visual field.

Under the various patterns of high luminance surfaces arrangement covering the whole visual field, the luminance difference threshold is determined to each subject for getting adaptation luminance. From the result of such subjective experiments, the additivity of adaptation luminance increase was confirmed in this paper.

Keywords : *Adaptation luminance, Complicated luminance distribution, Luminance difference threshold, Adaptation luminance increase, Additivity, Effective Luminance*

順応輝度、複雑輝度分布、輝度差弁別閾値、順応輝度増加量、加法性、実効輝度

1. はじめに

私たちが日常生活において経験している複雑な輝度分布を有する視野での順応輝度の把握は、明るさ、グレア、視認性、物の見易さなどの評価において考慮されなくてはならず、視覚的評価に共通する礎になる。複雑な輝度分布を有する視野での視認性に対する順応輝度の推定には、視野周辺部に存在する高輝度光源や視対象そのものなど視野全域の輝度の影響を考慮し、中心窩での視認性を検討する必要がある。

視野周辺部に存在するグレア源については、グレア源による眼球内散乱光が中心窩に重量し視覚感度の低下を引き起こすと考えられ、その重量光は中心窩における光幕輝度として定量的に取り扱われている。CIE 146 : 2002(TC 1-50)¹⁾は、L. L. Holladay, W. S. Stiles による周辺視野輝度による光幕輝度に関する研究^{2,3)}を J. K. Ijspeert の年齢や虹彩の色の異なる人に対する研究⁴⁾に基づいて適用対象を拡張し、注視点近傍については D.C. Green, F. W. Campbell らの MTF (Modulation Transfer Function)に関する研究⁵⁾に基づいて、広範な角度範囲に拡張した減能グレア式を示している。また、B. H. Crawford⁶⁾が示した複数のグレア光源の光幕輝度が各光源によるそれらの和になることを全視野に適用すれば、全視野による光幕輝度を導出可能である。しかしながらこれらの研究は周辺領域から注視部分への重量のみを考慮し、注視部分から周辺への重量を考えていないため、視対象の背景そのものをグレア源と考えた場合の視認性評価ができない。

伊藤ら⁷⁾は、視対象および背景からの眼球内散乱光の注視点における相互重量を考慮した実効輝度により、中心窩での視認性を説明し、実効輝度関数を提案している。更に、井上ら⁸⁾は視野周辺部までの実効輝度関数の定量方法を検討するために、高輝度面による順応輝度増加量に関する研究を行い、離角[注視線と、視点と対象とを結ぶ線とがなす角度]3.33° ～ 10.83° の範囲内では加法性が成立し、方位性が見られないことを確認している。

本稿では、離角 10.08° ～ 90° に高輝度面を規則的・離散的に配置可能な実験装置を用い、順応輝度と視覚感度とを関係づける輝度差弁別閾値の特定を行い、前報⁸⁾と同様に高輝度面呈示時と非呈示時の輝度差弁別閾値から順応輝度増加量を求め、その加法性の検討を行っている。全視野領域に渡って加法性の確認を行うことは、実効輝度関数の定量に加えて、眼球の光散乱特性を組み込み視野内の各部位の輝度との関係に基づく順応輝度算定法を構築する上でも重要であると考えられる。

2. 順応輝度増加量の加法性の検討方法

輝度差弁別閾値は、視標とその周辺の背景とが視認可能となる最小の輝度差であり、視覚感度に対応する値である。輝度分布を有する視野における順応輝度は、その視野での視覚感度と等しい視覚感度を与える均一輝度視野の輝度 L_b であり、その視野での輝度差弁別閾値と等しい輝度差弁別閾値を与える均一輝度視野の輝度 L_b' として定量

本論文は'06と'07にて建築学会近畿支部研究報告会にて発表した内容に、加筆したものである^{9),10)}。

*1 奈良女子大学大学院人間文化研究科 大学院生・修士(工学)

Graduate Student, Nara Women's University, Graduate School of Humanities and Sciences, M. Eng.

*2 関西大学環境都市工学部建築学科 専任講師・博士(工学)

Lecturer, Department of Architecture, Faculty of Environmental and Urban Engineering, Kansai University, Dr. Eng.

*3 奈良女子大学生活環境学部住環境学科 教授・工博

Prof., Dept. of Human Environment, Faculty of Residential Environment and Design, Nara Women's University, Dr. Eng.

される⁸⁾。図 1a に示すように、均一な視野に高輝度面を呈示した場合
には、均一輝度視野の順応輝度 L_b と高輝度面を呈示した時の順応輝
度 L_b' の差が順応輝度増加量 ΔL_{a1} に相当する。任意の輝度分布視野
の場合についても、図 1b に示すように、任意の輝度分布視野と、その
一部分の輝度を高くした輝度分布視野との順応輝度増加量は、前者と
後者の輝度分布視野それぞれの順応輝度 L_a と L_a' との差 ΔL_{a2} になる。
中心窩の順応をほぼ規定する均一輝度の近接背景(視標近傍の背景
のみ輝度を有する視野条件)に加えて、視標から十分に離れた位置に
高輝度面を呈示した場合、高輝度面による眼球内散乱光が網膜上の
近接背景像へ一様に重量することが視標の視認性低下を引き起こすと
考える。均一輝度視野の輝度と近接背景輝度が等しくても、均一輝度
視野は近接背景以外の箇所による眼球内散乱光によって輝度差弁別
閾値は近接背景の時と比べ、高いと考えられる。よって、均一輝度視野
の順応輝度は、近接背景の順応輝度と異なる。しかし、図 1c に示すよ
うにこの高輝度面による重量と等しい感度低下を引き起こす近接背景
輝度の増加量が順応輝度増加量に相当し非呈示時の近接背景輝度
と、高輝度面呈示時と等しい輝度差弁別閾値が得られる等価な近接
背景輝度との差 ΔL_{a3} で定量される。

順応輝度増加量の加法性の検討は、複数の高輝度面を呈示する呈
示パターンの個々の高輝度面による順応輝度増加量の総和が、それら
全体による順応輝度増加量になることを、視野全域を網羅した数種の
呈示パターンで検討することになる。

本稿では、近接背景周辺に規則的且つ離散的に呈示した各高輝度
面呈示条件において、円形視標と近接背景を被験者に注視させ円形
視標の輝度を調整させ輝度差弁別閾値を特定させる実験を行った。順
応輝度増加量の加法性を検討する為に設定した数種の組み合わせの
高輝度面呈示条件と非呈示条件で得られた輝度差弁別閾値を用いて、
高輝度面の呈示に等価な近接背景輝度増加量を算出し、これを順応
輝度増加量として、その加法性を検討した。

順応輝度増加量の加法性は、加法性の成立を仮定しない場合と仮
定した場合との輝度差弁別閾値の予測精度を検討して、両者に違い
がない場合に成立することとした。

3. 輝度差弁別閾値特定実験の実験方法

視角半径 5.09° の近接背景の輝度・高輝度面の位置(離角と方位角
[視線軸を軸とした回転角])と大きさを種々に設定し、被験者に視角直
径 8' の円形視標の輝度を調整させて輝度差弁別閾値を特定する実験

図 1 背景輝度と輝度差弁別閾値との模式図

を'05、'06 年度に実施した。被験者は顎置き台で視点を固定し、
900mm 離れた正面の視角半径 7.68° の開口部を通して、両眼で視対
象を観察した。

3.1. 視標呈示装置と高輝度面呈示装置

実験装置は暗室内に設置され、図 2 に示すように高輝度面を呈示す
る高輝度面呈示装置と視対象を呈示する視対象呈示装置とから構成
される。各装置の間は視線が通る開口部以外は遮光され、相互に影響
は無い。

高輝度面呈示装置には、離角 10.08° ~ 90.0° の種々の離角・方位
角方向に高輝度面を呈示可能とするために、視点から 900mm 離れた
正面上と、注視線を中心軸とした直径 2240mm の円柱側面上に、高輝
度面を規則的・離散的に配置した。正面高輝度面は、離角 10.08 ~
35.42° の範囲に方位角 60° 間隔で配置した 6 面、離角 35.42 ~
51.22° の範囲に方位角 30° 間隔で配置した 12 面の合計 18 面で、
円柱側面上の周辺高輝度面は離角 51.22° ~ 90.0° の範囲に方位角
30° 間隔で配置した 12 面である。各正面高輝度面は幅 100mm × 長さ
480mm、各周辺高輝度面は幅 100mm × 長さ 900mm で、輝度が一樣
になるように乳白色アクリル板拡散仕上げされた長方形平面であり、遮
光黒布で覆い発光面の大きさを調整可能である。各高輝度面は図 3 に
示す形状の、漏光がないように密閉し外側を黒色仕上げ、内部を白色
仕上げとした光源筒を用いて呈示した。正面高輝度面では 45 形ツイン
白色蛍光灯を 1 灯、周辺高輝度面では直管型白色蛍光灯 3 灯を内蔵
する。周辺高輝度面を呈示する条件では、その光による開口部周辺の
輝度上昇、及び、開口部を通して視標呈示装置へ入る光を抑制するた
めに、視点を頂点とし離角 51.22° 方向の母線を持つ円錐面の一部と
なる遮光板を設置した。

視対象呈示装置により、被験者はハーフミラーを透して見る視標光像
とハーフミラーで反射して見える近接背景光像との重量像を視対象とし
て観察する。ハーフミラーは被験者から 1500mm 離れた位置に、各光
像は 2300mm の位置に配置した。視標光像と近接背景光像は、各光
源 Box の発光面を、視角直径 8' の円形視標と視角直径 10.18° の円
形近接背景となるように黒紙で覆い構成した。各光源 Box は、輝度が
均一となるように乳白アクリル板を発光面とし、内部は白色で仕上げ、
直管型白色蛍光灯 5 本を内蔵する。又、発光面に被験者の顔が映りこ
まないようにし、外側を黒色仕上げとした。

近接背景の輝度は背景用光源 Box 内に白や灰、黒の布を組合せて
設置すること、視標の輝度は視標光像表面に偏光板と減光フィルムを
組合せて設置することで大幅に調整し、各光源 Box に内蔵する蛍光灯
の調光により微細に調整可能とした。

視点からの高輝度面及び視標用光像、近接背景用光像の輝度は、
各光源 Box や光源筒内部の照度と比例関係にある。実験時には事前
に得たその比例関係と随時測定したそれら照度に基づいて、高輝度面

表 1 高輝度面条件と離角範囲

高輝度面 呈示条件	離角範囲 (°)	装置
A	10.1 ~ 15.4	面呈示装置 (正面)
B	15.4 ~ 23.6	面呈示装置 (正面)
C	23.6 ~ 35.4	面呈示装置 (正面)
D	35.4 ~ 51.2	面呈示装置 (正面)
E	51.2 ~ 69.0	面呈示装置 (正面)
F	69.0 ~ 90.0	面呈示装置 (正面)

表 2 被験者の属性

年	被験者	両眼視力	性別
2005	H.K.	2.0	男
	Y.K.	1.6	男
	Y.S.	2.0	女
	N.N.	2.0	男
	S.Y.	1.6	男
2006	K.K.	1.5	男
	S.T.	1.5	男
	Y.Na.	1.0	男
	Y.Ni.	1.5	男
	H.H.	1.2	男

図2 実験装置 (左:立面図 右:被験者側の立面図)

図3 各高輝度面の詳細図 (上:周辺高輝度面 下:正面高輝度面)

図4 高輝度面非呈示条件 (等距離射影図)

図5 離角方向の加法性検討用の高輝度面呈示条件 ('05年度:A~D, G, K '06年度:A~F, G, K, I に設定、等距離射影図)

図6 方位角方向の加法性検討用の高輝度面呈示条件 ('05年度:A1~A8, C1~C8 '06年度:A3~A8, D3~D8, I3~I8 に設定、等距離射影図)

と近接背景の輝度を設定し、被験者が閾値として調整した視標光像の
に得たその比例関係と随時測定したそれら照度に基づいて、高輝度面
と近接背景の輝度を設定し、被験者が閾値として調整した視標光像の
みの輝度を輝度差弁別閾値として特定した。

3.2. 輝度差弁別閾値特定の為の実験条件と実験手順

高輝度面呈示条件の近接背景輝度は、'05年度は 1.0, 2.0, 5.0, 10
cd/m²、'06年度は 2.0, 3.5, 6.0, 10 cd/m²とした。高輝度面非呈示条件
の近接背景輝度は各年のそれらに 30, 100, 300 cd/m²を加えた。高輝度
面輝度は全て、8500cd/m²である。

視野内輝度分布の設定条件は、視対象のみを呈示する図 4 に示す
高輝度面非呈示条件と、図 5 と図 6 に示す高輝度面呈示条件の合計
37 条件を設定した。高輝度面呈示条件は離角方向の加法性を検討す
る為の 9 条件と方位角方向の加法性を検討する為の 28 条件とし、視野
領域の広範囲で加法性の検討を可能にする為に全視野領域に規則
的に高輝度面を配置した。各高輝度面の記号は高輝度面離角と対応
しており対応関係は表 1 に示す。'05 年度と'06 年度で異なる呈示条件
は図の表題に付記した。高輝度面呈示条件の試行回数は、'05 年度で
は正面高輝度面のみについて各条件 5 回で、'06 年度では正面高輝
度面に対する各条件 5 回実施の後、遮光板を s 設置して周辺高輝度
面に対して各条件 5 回実施した。高輝度面非呈示条件は高輝度面呈
示条件の全試行において実施しており、'05 年度は 5 回と'06 年度は 10
回となる。

被験者は、'05 年度では 21 歳～33 歳の男性 4 名/女性 1 名、'06 年
度では 21 歳～23 歳の男性 5 名である。裸眼またはコンタクトレンズ装
着者で、両眼視力は 1.0～1.5 である。被験者の属性を表 2 に示す。

被験者は暗室入室時には観察位置で目を閉じて 3 分間暗順応し、
視標が呈示されない視野内輝度分布の設定条件で 1 分間明順応した
後、視標の輝度を調整し輝度差弁別閾値を特定する試行を行う。次に、
ほぼ順応輝度増加量が小さい(およそ常に明順応となる)順に設定され
る高輝度面呈示条件に対して、設定の変更毎に 1 分間の順応を行い、
輝度差弁別閾値を特定する試行を繰り返した。この一連の作業を近接
背景輝度の条件毎に実施した。

4. 近接背景輝度と輝度差弁別閾値との関係

4.1. 高輝度面非呈示条件の輝度差弁別閾値

高輝度面非呈示時の近接背景輝度と輝度差弁別閾値との関係を、
被験者 S.T., K.K., N.N.について、図 7 に示す。これらの被験者は次段
落で示す標準偏差率が 10 人の内で最小値、中央値、最大値の者であ
る。図中の記号は実験で得た輝度差弁別閾値で、鎖線は後述するそ
の代表線である。近接背景輝度が高いと輝度差弁別閾値が高い。

実験で得た輝度差弁別閾値 ΔL_{th} のばらつきを示す、標準偏差率
 $\overline{RSD}$ (注)を算出した。本稿での平均値は幾何平均値を用いる。被験者
毎に算出した $\overline{RSD}$ を図 7 中に示す。全被験者に対する $\overline{RSD}$ の 90%レ
ンジは 1.22～1.49 である。

図7 高輝度面非呈示条件と数種の高輝度面呈示条件における近接背景輝度と輝度差弁別閾値との関係 (視標視角 8° 被験者:S.T./K.K./N.N.)

4.2. 高輝度面呈示条件の輝度差弁別閾値

高輝度面呈示条件 A,B,C,G における近接背景輝度と輝度差弁別閾値との関係を、被験者 S.T., K.K., N.N.について、図7に示す。図中の記号は実験で得た輝度差弁別閾値で、細線と太線は後述するその代表線、鎖線は4.1.で示した高輝度面非呈示時の代表線である。近接背景輝度が高いと輝度差弁別閾値が高い。高輝度面非呈示条件に比べて、高輝度面呈示条件の輝度差弁別閾値は高く、近接背景輝度の増分に対する輝度差弁別閾値の増分は小さい。被験者毎、高輝度面呈示条件毎に算出した輝度差弁別閾値の $\overline{RSD}$ を図7中に示す。全被験者、全条件に対する $\overline{RSD}$ の90%レンジは1.16～1.61である。

5. 高輝度面呈示条件の順応輝度増加量の特定

2.に示した近接背景輝度 L_b と輝度差弁別閾値 ΔL_{th} 及び高輝度面呈示条件に等価な近接背景輝度増加量 ΔL_a の関係は、高輝度面呈示条件に等価な近接背景輝度増加量が近接背景輝度に依存しない⁸⁾ことから、この関係を(1)式によって表現した。

$$\log \Delta L_{th} = a \cdot (\log (L_b + \Delta L_a))^2 + b \cdot \log (L_b + \Delta L_a) + c \quad (1) \text{式}$$

2.で論じたとおり、高輝度面の呈示に等価な近接背景輝度増加量は順応輝度増加量に相当することから近接背景輝度増加量 ΔL_a を順応輝度増加量として取り扱う。高輝度面非呈示条件の近接背景輝度と輝度差弁別閾値の関係から(1)式中の係数 a, b, c を特定し、特定した係数を用いた(1)式によって輝度差弁別閾値を良く説明する順応輝度増加量を特定することで、高輝度面非呈示条件と呈示条件で得られた輝度差弁別閾値に基づいて高輝度面の順応輝度増加量を特定できる。本章では被験者毎に、全ての高輝度面呈示条件共通の係数 a, b, c 及び高輝度面呈示条件毎に特定した順応輝度増加量による輝度差弁別閾値の平均誤差率を算出し、その予測精度を確認する。

5.1. 高輝度面非呈示条件による輝度差弁別閾値曲線

高輝度面非呈示条件において(1)式の $\Delta L_a = 0$ として実験及び(1)式に基づく輝度差弁別閾値の対数での差の二乗和が最小になるように決定した。決定した係数 a, b, c は図7中に示す。図7の高輝度面非呈示条件の鎖線は特定した係数を用いた(1)式に基づく近接背景輝度と輝度差弁別閾値の関係である。実験で得られた輝度差弁別閾値を十分に代表している。

本節で予測される輝度差弁別閾値 $\Delta L_{th}'$ と、実験値 ΔL_{th} との差異である平均誤差率 $\overline{RSE}$ ^{注)}を算出した。被験者毎に $\overline{RSE}$ を図7中に示す。全被験者に対する $\overline{RSE}$ の90%レンジは1.28～1.54である。これは4.1.に示した実験値のばらつきを示す標準偏差率 $\overline{RSD}$ と大差ない。

5.2. 高輝度面の順応輝度増加量の特定と輝度差弁別閾値の予測誤差

高輝度面呈示条件の輝度差弁別閾値と5.1.で特定した係数 a, b, c を用いて、高輝度面呈示条件毎に、実験及び(1)式に基づく輝度差弁別閾値との対数の差の二乗和が最小になるように順応輝度増加量を特定した。但し、順応輝度増加量の特定に用いる高輝度面呈示条件と近接背景輝度条件の組み合わせは、同じ近接背景輝度における高輝度面呈示条件と非呈示条件との輝度差弁別閾値の対数の差が t 検定によって有意水準0.05で有意とされた条件に限定した。 t 検定で有意とされなかった条件の多くは、近接背景輝度が高い条件である 10 cd/m^2 の場合や、視野周辺部にある高輝度面呈示条件の F, I3～I8 の場合である。

高輝度面呈示条件の近接背景輝度と輝度差弁別閾値の関係を示した図7中の細線は、特定された係数と表4に示す順応輝度増加量を用いた(1)式に基づく関係であり、実験で得た輝度差弁別閾値を十分に代表している。高輝度面呈示条件毎に、特定された順応輝度増加量に基づく輝度差弁別閾値と実験で得た輝度差弁別閾値の平均値の関

図 8 高輝度面呈示条件毎に特定された順応輝度増加量に基づく輝度差弁別閾値と、実験で得た輝度差弁別閾値の平均値の関係
(視標視角 8° 被験者 3 人分、t 検定で有意な差と認められなかった近接背景輝度の条件も含む)
[RSDAv は全高輝度面呈示条件の標準偏差率の平均値、RSE1Av は全高輝度面呈示条件の平均誤差率の平均値]

図 9 加法性を仮定して特定した順応輝度増加量に基づく輝度差弁別閾値と実験で得た輝度差弁別閾値の平均値の関係
(視標視角 8° 被験者 3 人分、t 検定で有意な差と認められなかった近接背景輝度の条件も含む)
[RSDAv は全高輝度面呈示条件の標準偏差率の平均値、RSE2Av は全高輝度面呈示条件の平均誤差率の平均値]

表 3 高輝度面呈示条件毎に特定した順応輝度増加量に基づく被験者 3 人の、呈示条件毎の平均誤差率 RSE1 一覧 (t 検定で有意な差と認められなかった近接背景輝度の条件も含む)
(※各欄の網掛けの濃さが有意水準 0.05 の t 検定の有意差が認められる近接背景輝度条件数 〇→4 条件、斜線→3 条件、点線→2 条件、黒→1 条件、白→0 条件)

		高輝度面呈示条件																			全条件 RSE1Av														
		A	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B	C	D	C/D	C or D								E	F	G	K	I	I3	I4	I5	I6	I7	I8		
															1	2	3	4	5	6		7												8	
被験者	S.T.	1.31			1.29	1.28	1.31	1.29	1.29	1.36	1.28	1.19	1.35	D				1.25	1.30	1.33	1.33	1.36	1.27	1.25	1.21	1.39	1.22	1.24	1.23	1.20	1.23	1.29	1.18	1.20	1.26
	K.K.	1.38			1.32	1.33	1.26	1.35	1.27	1.41	1.28	1.35	1.25	D			1.29	1.29	1.30	1.27	1.25	1.40	1.26	-	1.39	1.36	1.36	-	1.42	1.35	1.24	1.32	1.39	1.32	
	N.N.	1.65	1.48	1.39	1.37	1.41	1.39	1.40	1.39	1.36	1.57	1.44	C	1.44	1.32	1.41	1.60	1.37	1.53	1.47	1.46					1.78	1.57							1.48	

表 4 加法性が成立すると仮定した場合と仮定した場合の高輝度面呈示条件毎の順応輝度増加量一覧 (視標視角 8°) ※欄の網掛けは表 3 と同じ
(※各欄の網掛けの濃さが有意水準 0.05 の t 検定の有意差が認められる近接背景輝度条件数 〇→4 条件、斜線→3 条件、点線→2 条件、黒→1 条件、白→0 条件)

		高輝度面呈示条件																															
		C or D																		E	F	G	K	I	I3	I4	I5	I6	I7	I8			
		A	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B	C	D	C/D	1	2	3	4	5												6	7	8
S.T.	加法性:無	21.5			11.8	14.5	12.9	13.9	12.9	12.9	20.2	15.1	21.1	D			7.48	10.6	12.3	13.4	9.61	8.54	7.18	3.19	60.8	77.6	11.0	2.89	6.14	7.14	5.56	2.85	3.35
	加法性:有	25.2			11.6	13.4	12.7	13.6	11.9	12.6	20.0	15.0	20.7	D			7.41	10.9	12.2	13.3	9.81	8.46	6.78	3.02	60.2	80.9	9.81	3.29	6.65	6.67	6.52	3.16	3.13
K.K.	加法性:無	25.1			11.7	12.5	14.4	15.1	14.2	13.1	21.0	15.6	14.2	D			6.95	9.98	9.99	9.46	7.98	6.88	7.66		46.0	56.2	8.98		4.42	5.94	5.88	3.59	2.90
	加法性:有	25.4			11.1	11.9	13.3	14.3	13.5	12.1	17.3	13.1	16.0	D			6.75	8.85	9.65	9.23	7.13	6.33	6.89	1.47	55.8	71.8	8.36	1.52	4.65	5.69	5.84	3.72	2.68
N.N.	加法性:無	10.3	6.58	5.84	5.85	5.68	6.01	5.45	5.16	6.16	5.94	6.69	C	3.34	2.69	2.60	3.35	4.75	4.04	3.21	2.77			19.1	20.9								
	加法性:有	11.2	5.91	5.26	5.78	5.86	5.52	5.39	5.31	5.65	5.29	5.84	1.27	C	3.11	2.73	2.23	2.98	3.78	3.60	2.86	2.06		22.3	23.6								

表 5 加法性を入れて特定した順応輝度増加量に基づく被験者 3 人の、呈示条件毎の平均誤差率 RSE2 一覧 ※欄の網掛けは表 3 と同じ
(※各欄の網掛けの濃さが有意水準 0.05 の t 検定の有意差が認められる近接背景輝度条件数 〇→4 条件、斜線→3 条件、点線→2 条件、黒→1 条件、白→0 条件)

		高輝度面呈示条件																				全条件 RSE2 _{av}												
		A	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B	C	D	C/D	C or D								E	F	G	K	I	I3	I4	I5	I6	I7	I8	
															1	2	3	4	5	6	7													8
被験者	S.T.	1.30			1.28	1.27	1.31	1.28	1.28	1.35	1.26	1.19	1.35	D			1.24	1.29	1.32	1.33	1.32	1.23	1.23	1.21	1.38	1.20	1.22	1.23	1.20	1.24	1.29	1.14	1.19	1.26
	K.K.	1.38			1.32	1.33	1.27	1.36	1.28	1.41	1.33	1.37	1.26	D			1.29	1.30	1.31	1.27	1.26	1.39	1.26	1.42	1.45	1.44	1.36	1.50	1.44	1.35	1.24	1.33	1.34	
	N.N.	1.65	1.48	1.39	1.37	1.41	1.40	1.40	1.39	1.36	1.58	1.55	1.73	C	1.43	1.32	1.40	1.59	1.64	1.53	1.45	1.45				1.80	1.58						1.49	

係を、t 検定で有意とされなかった条件での輝度差弁別閾値を含めて、被験者 3 人 S.T., K.K., N.N. について図 8 に示す。傾き 1 の直線上に記号が集中し両者に大差は見られず、ここで特定された順応輝度増加量により高輝度面呈示時の輝度差弁別閾値が予測可能である。

本節で予測される輝度差弁別閾値 ΔL_{th} と、実験値 ΔL_{th} との差異である平均誤差率 $RSE1$ ²⁾ を算出した。被験者毎、高輝度面呈示条件毎に算出した $RSE1$ を表 3 と図 7 中に示す。また、各高輝度面呈示条件の標準偏差率 RSD の、被験者毎の平均を RSD_{Av} とし、同様に平均誤差 $RSE1$ の平均を $RSE1_{Av}$ とし、両者を図 8 中に示す。全被験者・全条件に対する $RSE1$ の 90%レンジは 1.19～1.70 である。これは 4.2. に示した実験値のばらつきを示す標準偏差率 RSD と大差ない。

6. 順応輝度増加量の加法性の検討

順応輝度増加量の加法性の検討は、5. で加法性が成立すると仮定しなかった場合の輝度差弁別閾値の平均誤差率に対して、加法性が成立すると仮定した場合の平均誤差率の増大を検討することで行う。

6.1. 加法性が成立とした場合の順応輝度増加量の特定

加法性が成立すると仮定した場合の順応輝度増加量は、ある高輝度面呈示パターンを分割した高輝度面呈示パターンの順応輝度増加量の総和がそれら全体による順応輝度増加量になるとの制約条件を(1)式中に与えた上で、5.2. で示した方法と同様に、実験及び(1)式に基づく輝度差弁別閾値の対数での差の二乗和が最小になるように順応輝度増加量を特定した。加法性の検討条件を離角方向と方位角方向に分けて表 6 に示す。輝度差弁別閾値で有意にならなかった高輝度面呈示条件では被験者毎に制約条件の組み合わせを変えた。

高輝度面呈示条件の近接背景輝度と輝度差弁別閾値の関係を示した図 7 中の太線は、加法性を仮定して特定した順応輝度増加量を用いた関係であり、実験で得た輝度差弁別閾値を十分に代表している。加法性を仮定して特定した順応輝度増加量に基づく輝度差弁別閾値と実験で得た輝度差弁別閾値の平均値の関係を被験者 3 人について図 9 に示す。加法性を仮定しない図 8 と同様に傾き 1 の直線上に記号が集中し両者に大差は見られず、加法性を仮定して特定された等価順応輝度増加量により輝度差弁別閾値が予測可能である。5.2. で特定した順応輝度増加量と、加法性を仮定して特定した順応輝度増加量を表 4 に示す。加法性の仮定の有無による順応輝度増加量に大差ない。

表 6 加法性を検討するための

各高輝度面呈示条件の順応輝度増加量の制約条件		
離角方向の条件	方位角方向の条件	
$\Delta L_0(G) = \Delta L_0(A) + \Delta L_0(B) + \Delta L_0(C)$	$\Delta L_0(A2) = \Delta L_0(A) - \Delta L_0(A1)$	$\Delta L_0(C2) = \Delta L_0(C) - \Delta L_0(C1)$
$\Delta L_0(K) = \Delta L_0(A) + \Delta L_0(B) + \Delta L_0(C) + \Delta L_0(D)$	$\Delta L_0(A6) = \Delta L_0(A) - \Delta L_0(A3)$	$\Delta L_0(C6) = \Delta L_0(C) - \Delta L_0(C3)$
$\Delta L_0(F) = \Delta L_0(I) - \Delta L_0(E)$	$\Delta L_0(A7) = \Delta L_0(A) - \Delta L_0(A4)$	$\Delta L_0(C7) = \Delta L_0(C) - \Delta L_0(C4)$
	$\Delta L_0(A8) = \Delta L_0(A) - \Delta L_0(A5)$	$\Delta L_0(C8) = \Delta L_0(C) - \Delta L_0(C5)$
	$\Delta L_0(D6) = \Delta L_0(D) - \Delta L_0(D3)$	$\Delta L_0(I6) = \Delta L_0(I) - \Delta L_0(I3)$
	$\Delta L_0(D7) = \Delta L_0(D) - \Delta L_0(D4)$	$\Delta L_0(I7) = \Delta L_0(I) - \Delta L_0(I4)$
	$\Delta L_0(D8) = \Delta L_0(D) - \Delta L_0(D5)$	$\Delta L_0(I8) = \Delta L_0(I) - \Delta L_0(I5)$

本節で予測される輝度差弁別閾値 ΔL_{th} と、実験値 ΔL_{th} との差異である平均誤差率 $RSE2$ ²⁾ を算出した。被験者毎、高輝度面呈示条件毎に算出した $RSE2$ を表 5 と図 7 中に示す。また、平均誤差 $RSE2$ の被験者毎の平均を $RSE2_{Av}$ とし、図 9 中に示す。全被験者・全条件に対する $RSE2$ の 90%レンジは 1.19～1.70 である。これは 4.2. に示した実験値のばらつきを示す標準偏差率 RSD と大差ない。

表7 被験者3人の、高輝度面呈示条件毎の平均誤差率 $\overline{RSE1}$ に対する平均誤差率 $\overline{RSE2}$ の比率一覧 ※欄の網掛けは表3と同じ
(※各欄の網掛けの濃さが有意水準0.05のt検定の有意差が認められる近接背景輝度条件数 □→4条件 ▨→3条件 ▩→2条件 ■→1条件 ■→0条件)

	高輝度面呈示条件																																
	A	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B	C	D	C/D	C or D								E	F	G	K	I	I3	I4	I5	I6	I7	I8	
														1	2	3	4	5	6	7	8												
被験者	K.K.	1.00			1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.03	1.02	1.01	D				1.00	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00		1.04	1.06	1.00		1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
	S.T.	1.02			1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	D				1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00		
	Y.Na.	1.05			1.01	0.96	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	D				1.00	0.97	1.00	1.01	0.99		0.87	0.97	1.07	1.08		0.99	0.86	1.02	0.82		
	Y.Ni.	1.00			1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	D				1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		1.02	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
	H.H.	1.01			1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	D				1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01		1.00	1.00	0.97		1.00	1.03	1.00		
	H.K.	1.00	1.02	1.00	1.00	1.03	1.00	1.00	1.02	1.00	1.00	1.02	1.00	C	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00		1.04	1.00								
	Y.K.	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	C	1.01	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.02		1.00	1.02								
	Y.S.	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01	1.02	1.03	1.00	C	1.00	1.00	1.01	1.02	1.01	1.01	1.02	1.01		1.02	1.04								
	N.N.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.07	C	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99			1.01	1.00								
	S.Y.	1.01	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	0.98	1.00	C	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01		1.02	1.02									

6.2. 加法性の仮定による平均誤差率の増加量

5.2.で得られた加法性を仮定しない場合に予測される輝度差弁別閾値の平均誤差 $\overline{RSE1}$ に対する、加法性を仮定した場合の $\overline{RSE2}$ の比率 ($\overline{RSE2}/\overline{RSE1}$)を被験者10人について表7に示す。比率は0.82～1.08であり、全体としては順応輝度増加量に加法性が成立すると仮定しても輝度差弁別閾値の予測平均誤差率には大差ない。表5にて網掛けで示した一部の高輝度面呈示条件では、高輝度面呈示による輝度差弁別閾値の増加はわずかで、t検定で有意差が認められた条件が少なく、順応輝度増加量の特定に用いた条件数が少ない為に順応輝度増加量の精度が低くなり平均誤差率の比率が高くなったと考えられる。それら条件を除けば比率は1.00～1.06となり、加法性が成立するとの仮定による予測平均誤差率の増加はわずかである。

順応輝度増加量に加法性が成立することが確認された。

7. おわりに

視野領域全域に離散的規則的に設定した高輝度面を用いて輝度差弁別閾値を特定する被験者実験を行い、順応輝度増加量の加法性を検討した。実験で得られた輝度差弁別閾値の標準偏差と加法性が成立すると仮定し算出した輝度差弁別閾値の平均誤差とに大差なく加法性の有無による平均誤差率の違いはわずかなことから、順応輝度増加量の加法性が成立するとの結論を得た。今後は視野領域全域における順応輝度増加量の方位性の検討を行った上で、実効輝度関数の定量を行い、順応輝度算定法を構築する。

謝辞

本研究は、2006年5月に逝去された故野口太郎先生と共に取り組んだ課題であります。野口太郎先生は最後まで研究に勤しみ、私たちをご鞭撻くださいました。また、'05、'06年度関西大学卒業生である岩垣洋輔さん、山崎崇さん、宇田麻希子さん、桑垣内恵介さんと共に取り組んだ研究です。ここに記して深く感謝いたします。

注

標準偏差 $\overline{RMSD}$ /標準偏差率 $\overline{RSD}$ /平均偏差 $\overline{RMSE}$ /平均偏差率 $\overline{RSE}$ 、 $\overline{RSE1}$ 、 $\overline{RSE2}$ は同一近接背景輝度条件の輝度差弁別閾値のばらつきを示す統計量である。
■一般式を付表1に示す。

- 標準偏差 $\sigma(i)$: 標本 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ の幾何平均値 $\bar{x}(i)$ に対する対数でのばらつきを示す値である(付表1の(II)式)。
- 標準偏差率 $k(i)$: $\sigma(i)$ に対応する値であり、標本のばらつきを比率で示す(付表1の(III)式)。例えば、標準偏差率 $k(i)$ 1.02の時、標本が2%ばらついていることを示す。
- 標準偏差率 $\bar{k}$: 異なる標本間での標準偏差 $\sigma(i)$ の平均 $\bar{\sigma}$ に対応する値である(付表1の(V)式)。

■付表1中の式で用いられる記号と本文中の用語との対応関係を付表2で示す。

- 標準偏差 $\overline{RMSD}$ (Root - Mean - Square Deviation)と標準偏差率 $\overline{RSD}$ (Relative Standard Deviation)は実験で得られた輝度差弁別閾値のばらつきである。
 - 平均誤差 $\overline{RMSE}$ (Root - Mean - Square Error)と平均誤差率 $\overline{RSE}$ 、 $\overline{RSE1}$ 、 $\overline{RSE2}$ (Relative Standard Error)は回帰値に対する輝度差弁別閾値のばらつきを示す。
- $\overline{RMSD}$ と $\overline{RSD}$ が対応しており、 $\overline{RMSE}$ と $\overline{RSE}$ 、 $\overline{RSE1}$ 、 $\overline{RSE2}$ が対応しており、これらは、付表1の一般式に付表2に示す諸量に対応させることで得られる。

付表1 本稿中の統計量の一般式			付表2 付表1中の記号に対する本文中の用語との対応表		
用語	一般式	式No.		本稿中の用語	
幾何平均 $\bar{x}(i)$	$\log \bar{x}(i) = \frac{\sum_{j=1}^n \log x(i, j)}{n}$	(I)式	対応関係表	$x(i, j)$	輝度差弁別閾値の実験値 ΔL_{th}
標準偏差、平均誤差 $\sigma(i)$	$\sigma(i) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\log x(i, j) - \log \bar{x}(i))^2}{n}}$	(II)式		$\bar{x}(i)$	輝度差弁別閾値の幾何平均値
標準偏差率、平均誤差率 $k(i)$	$\log k(i) = \sigma(i)$	(III)式		$\sigma(i)$	標準偏差弁別閾値の回帰値 $\Delta L_{th}'$
標準偏差、平均誤差の平均 $\bar{\sigma}$	$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{j=1}^m \sigma(i)}{m}$	(IV)式		$\bar{k}$	RMSD
標準偏差率、平均誤差率の平均 $\bar{k}$	$\log \bar{k} = \bar{\sigma}$	(V)式		m	標準偏差率
				n	RSE, RSE1, RSE2
					近接背景輝度条件数
					試行回数

参考文献

- 146 CIE TC 1-50 reports: CIE equations for disability glare, CIE COLLECTION ON GLARE 2002, pp. 1-12
- L. L. Holladay : The fundamentals of glare and visibility , J. Physiol. , 181 , pp. 576-593 , 1965
- W. S. Stiles : The effect of glare on the brightness difference threshold , Proc. Roy. Soc. , London 105B , pp. 131-146 , 1929
- J. K. Jäspert, et al : The intraocular straylight function in 129 healthy volunteers ; dependence on angle, age and pigmentation , Vision Res. , 30 , pp. 699-707 , 1990
- F. W. Campbell, and D. C. Green: Optical and retinal factors affecting visual resolution. , J. Physiol. , 181 , pp. 576-593 , 1965
- B. H. Crawford : The integration of the glare effects from a number of glare sources , Proceedings of the Physical Society , 48 , pp.35-37 , 1936
- 伊藤克三、野口太郎、井上容子: 実効輝度による視認問題の統一的解明、照明学会誌、第72巻第6号、pp.34-41、1988.06
- 井上容子、野口太郎、伊藤克三: 高輝度面の実効輝度への影響 実効輝度関数 $F(\theta)$ の定量化に関する検討(その1)、日本建築学会計画系論文集、第473号、pp.1-6、1995.07
- 池上陽子、原直也、井上容子、野口太郎: 輝度分布を有する視野における順応輝度に関する研究－順応輝度増加量の方位性と加法性の検討－、平成18年日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.73-76、2006.06
- 池上陽子、宇田麻希子、原直也、井上容子: 複雑な輝度分布視野での視認性における順応輝度に関する研究－順応輝度増加量の加法性の検討－、平成19年日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.89-93、2007.06

(2007年6月10日原稿受理、2007年12月28日採用決定)