閃光の実効光度

正会員 古 莊 雅 生 (神戸商船大学)

専門会員 河 合 悟 (中京大学)

Effective Intensity of a Flash Light

Member Masao Furusho (Kobe University of Mercantile Marine)

Fellow Member Satoru Kawai (Chukyo University)

ABSTRACT

We carried out the psychophysical experiment matching and comparing the intensity of a flash light with that of a fixed light, because some papers have reported that the formula for the effective intensity of a flash light presented by Blondel & Rey in 1912 can not be applied when the background is bright and when the luminance exceeds a certain threshold.

As a result of this experiment, we propose that the effective intensity of a flash light when background condition is 0 cd/m² be expressed by

$$\log_e(Y) = [-4.4 + 0.88 \times \log_e(X)] + 0.7 \times \log_e(T)$$

Y : Effective intensity of a flash light in lx. (Illuminance of a fixed light at the observer's eye in lx.)

X : Illuminance of a flash light at the observer's eye in lx.

T : Lighting time period in msec.

KEYWORDS : effective intensity, flash light, fixed light, threshold of luminance, background

1. 目的

海上交通をはじめ、陸上交通、航空交通等の交通システムで用いられている視覚信号には、安全を目的としたさまざまな信号がある。視覚信号のうち短時間に急激な発光で暗の時間より明の時間の短い閃光は、誘目性と識別性に優れ、交通システムには必要不可欠な視覚信号であるといっても過言ではない。

閃光灯火を知覚する心理的な明るさを評価するために、閃光と同じ明るさに見える定常光の光度をもって表す実効光度という概念が用いられる。この実効光度としては実験的に求めた Blondel&Rey の式¹⁾に Douglas が修正した次式(1)を用いることが多い。

$$I_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} I dt}{a + (t_2 - t_1)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 I_e : 実効光度 (cd), I : 瞬時光度 (cd)

t_1, t_2 : 積分範囲を示す時間 (sec), a : 定数 (0.21) である。

しかし、(1)式で得られる実効光度は、実験条件から考えると夜間の閾値を与える実効光度のみであり、同じ夜間であっても閃光の光度が高光度の場合及び背景の輝度条件が異なる薄明と昼間を含めた実効光度には適用できないと考えられる。池田らは Xe 白色閃光の実効光度について、既にそのことを報告²⁾している。さらに、その中で背景の輝度を 0, 0.1, 1, 10, 100cd/m²の5段階とし、閃光を閾値、適正、グレア下限、上限の4条件、さらに閃光時間を種々に変化させたときの Blondel&Rey 計算値に対する

相対値を求め、閾値以外の閃光では極大あるいは極小となる閃光時間のあることを指摘している。

本研究は、背景の明るさが 0 cd/m²の夜間及び 30cd/m²の薄明の2通りとし、Xe ランプ光源とは異なる白色無電極光源ランプを用いて、閃光の明るさを種々の光度として組み合わせ、閃光の実効光度(本論では、定常光の角膜照度で表し、以下「実効光度」とする。)に関する新たな計算式を提案することが目的である。

2. 実験

2.1 実験装置

閃光発生装置を図1に、実験装置制御系統を図2に示す。光源には、松下電工(株)製の白色(色度(公表値) : $X=0.349, Y=0.360$)無電極点灯ランプ(商品名 : エバーライト18)を用いる。光源ランプの主な特徴は、調光が容易にでき、立ち上がりが約 5 msec という瞬時点灯が可能であり、高周波点灯によりフリッカーを生じないことである。光源ランプから発せられる光は、発光部に近接して取り付けられたアパーチャの直径 3 mm ϕ (視角2.1分)の穴を通過する。閃光及び定常光の明るさは、光源自体の調光割合による調整と光学フィルターによる調整との組み合わせにより、フィルター透過率が 0.02~100 (%)、観測者の目の位置における角膜照度で表すと $2.2 \times 10^{-6} \sim 1.1 \times 10^{-2}$ (lx) までの段階的な変更が可能である。

両光源の中央には、LED 光源による赤色の光点を十分暗くして提示し、これを凝視点とする。

被験者の目の位置がずれることにより角膜照度が変わるおそれ

図1 閃光発生装置
Fig. 1 Flash light indicator

図3 調光割合と閃光及び定常光の輝度
Fig. 3 Luminance of a flash light and fixed light relating to matching ratio

図2 実験装置制御系統
Fig. 2 Control system of the experimental equipment

をなくすため、あご台を用いる。

閃光及び定常光は、パーソナルコンピュータ及び制御プログラムにより閃光の点灯時間、調光割合、凝視点とする赤色のLEDの位置等を変更することができる。実験は、標準刺激として閃光を、また比較刺激として定常光を用い、定常光の制御は、被験者が調光割合を1%のステップで連続的に操作できるボタン式の調光調整スイッチを押すことにより調節する。

中心視を考慮し、閃光と定常光の間隔は20cm、観測距離は500cm、視角は2.2度である。

両光源からの光の強さは、観測点における法線照度(角膜照度)で表す。

角膜照度を算出するために、閃光及び定常光について、それぞれの調光割合に対して測定された輝度計の読みとの関係を図3に示す。図中の破線は、近似直線で示される理論的計算値である。

2.2 実験条件

実験は、閃光の点灯時間、背景の輝度、フィルター条件、被験

者について、それぞれ次のような実験条件を組み合わせで行う。

閃光の点灯時間は、閃光の立ち上がりと実験装置の特性を考慮し、上昇系列で5～500msecまでとするが、定常光の明るさと閃光の明るさが等しいと被験者が判断し、その判断が継続したところでその試行を終了する。

閃光の繰り返し間隔は、被験者が閃光発生ボタンを押し続ける場合でも約1.5secである。

背景の輝度は、暗室無照明の0 cd/m²及び蛍光灯を用いて照明する30cd/m²の2通りである。背景とは定常光及び閃光の光源を中心とする約2°視野の範囲を示し、凝視点を中心とする約4°視野の範囲である。背景輝度の分布については、拡散板を用いた照明をしていないため完全な均一性はないが、約4°視野の範囲を無作為に抽出して測定した平均値の概略値である。

閃光の光度条件は、背景の輝度が0 cd/m²の場合、閃光の角膜照度で示すと、 2.2×10^{-6} 、 8.8×10^{-6} 、 2.0×10^{-4} 、 5.2×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 、 5.5×10^{-3} 、 1.1×10^{-2} lxの7通りである。また、背景の輝度が30cd/m²の場合は、 1.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-3} 、 1.1×10^{-2} lxの3通りである。閃光の光度条件として示す値は、閃光のピーク値(閃光の立ち上がりが約5 msec)にフィルター透過率をかけて求めた角膜照度値である。

被験者は、背景の輝度0 cd/m²の場合が3名、背景の輝度が30 cd/m²場合は2名で、すべて男性、年齢は20～21才、色覚正常で視力(含矯正)は0.7～1.2である。

2.3 実験方法

実験は、被験者を実験前約30分間(背景の輝度が30cd/m²の場合は約10分間)順応させ、白色閃光の明るさと等しいと知覚する白色定常光の明るさを調整しながら決定する調整法という精神物理学的手法を用いる。

閃光と定常光の被験者への提示は同時に行われ、被験者が定常光の明るさを決定するまで定常光の提示は継続される。閃光の点灯時間について、その提示条件はランダムである。そして、一つの実験条件に対して3回の試行を行う。

凡例：閃光の角膜照度 (lx)

● 1.1×10^{-2} ▼ 5.5×10^{-3} ▲ 1.0×10^{-3} □ 5.2×10^{-4} × 2.0×10^{-4} ◆ 8.8×10^{-6} ■ 2.2×10^{-6}

図4 閃光の点灯時間に対する実効光度
(背景の輝度が0 cd/m²)

Fig. 4 Effective intensity to the duration of a flash light (When background condition is 0cd/m²)

凡例：閃光の角膜照度 (lx)

● 1.1×10^{-2} ▲ 1.0×10^{-3} × 1.1×10^{-4}

図5 閃光の点灯時間に対する実効光度
(背景の輝度が30cd/m²)

Fig. 5 Effective intensity to the duration of a flash light (When background condition is 30cd/m²)

3. 結果

3.1 背景の輝度0 cd/m²の場合

閃光の点灯時間と定常光の角膜照度で表わす実効光度との関係を図4に示す。横軸は、閃光の点灯時間を msec 単位で目盛り、縦軸は実効光度 (lx) の対数で目盛りである。

実効光度は、閃光の点灯時間が長くなるにつれて閃光の角膜照度レベルに達するまで上昇する関係がある。

30mL 以上になると認められるという³⁾Broca-Sulzer 効果は、今回の実験では見られなかった。

3.2 背景の輝度30cd/m²の場合

閃光の点灯時間と実効光度との関係を図5に示す。

閃光の点灯時間に対する実効光度は、被験者の違い、あるいは、閃光の角膜照度レベルの違いにかかわらず、閃光の点灯時間がお

よそ40msec までの範囲で急上昇し、その後緩やかに上昇しながら閃光の角膜照度レベルまで達するという傾向を示している。

4. 検討及び考察

4.1 Blondel-Rey の式から求められる実効光度

Blondel-Rey による(1)式は、閃光の点灯時間がおよそ500msec までの短い時間範囲では当てはまらないことが既に発表されている²⁾⁴⁾⁵⁾。

今回の実験結果においても、(1)式に当てはまらないことは図6に示すとおりである。実線で示す Blondel-Rey 値は、常に実測値 (各被験者データの平均値) 以下である。

そこで、閃光の実効光度を推定するために、実験データに当てはめた近似関数から実験式を求めるというアプローチを行う。

4.2 実効光度を求めるための実験式

実験データの定性的な傾向を調べるため、データ解析ソフト「Ngraph Ver.5.31」⁶⁾を用いて最小二乗法により関数を求める。

まず、各被験者のデータに相関係数が0.9以上で最もよくフィットする関数を求めると、次式(2)で近似される「べき関数」を得る。

$$\log_e(Y) = \beta_N + \alpha_N \times \log_e(T) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、Tは閃光の点灯時間(msec)、Yは実効光度(lx)、 α_N 、 β_N は係数である。

これは、実効光度の対数が、閃光の点灯時間の対数と高い相関があり、閃光の角膜照度レベルに達することを意味する。

凡例：閃光の角膜照度 (lx)
● 1.1 × 10⁻² ▲ 1.0 × 10⁻³ × 2.0 × 10⁻⁴
◆ 8.8 × 10⁻⁵ ■ 2.2 × 10⁻⁶ — Blondel-Rey値

図6 閃光の点灯時間に対する実効光度及び Blondel-Rey 値
Fig.6 Effective intensity to the duration of a flash light and Blondel-Rey value

係数 α_N は、閃光の点灯時間の対数に対する実効光度の増加率を表す。また、係数 β_N は、閃光の角膜照度レベルをパラメータとする実効光度の Y 切片を表すと考えることができる。

近似式の係数 α_N , β_N , ポイントデータ数及び相関係数について、背景の輝度が0 cd/m²の場合を $\alpha_N = \alpha$ 1, $\beta_N = \beta$ 1, 背景の輝度が30cd/m²の場合を $\alpha_N = \alpha$ 2, $\beta_N = \beta$ 2として、表1及び表2に示す。

4.2.1 背景の輝度0 cd/m²の場合

表1の係数 α_1 は、閃光の角膜照度レベルや被験者の違いによる定性的な傾向はなく、その平均値は $\alpha_1 = 0.7$ である。

表1の係数 β_1 と閃光の角膜照度との関係を図7に示す。係数 β_1 は閃光の角膜照度の対数に比例し、図中の破線が表す次式(3)で近似される。

$$\beta_1 = -4.4 + 0.88 \times \log_e(X) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、Xは閃光の角膜照度 (lx) である。

(2)式に α_1 及び(3)式の β_1 を代入すると、実効光度は次式(4)となる。

$$\log_e(Y) = [-4.4 + 0.88 \times \log_e(X)] + 0.7 \times \log_e(T) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、Yは実効光度 (lx)、Xは閃光の角膜照度 (lx)、Tは閃光の点灯時間 (msec) である。

表2 近似式の係数 α_2 , 係数 β_2 , ポイントデータ数及び相関係数(背景の輝度30cd/m²の場合)
Table 2 Coefficient α_1 , β_1 of the approximate formula, number of data and coefficient of correlation (When background condition is 30cd/m²)

閃光の角膜照度 (lx)		1.1 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻³	1.1 × 10 ⁻²
係数	被験者			
α_2	T	0.60	0.52	0.47
	N	0.78	0.64	0.48
β_2	T	-12.22	-9.88	-7.38
	N	-12.16	-10.40	-8.26
ポイントデータ数	T	13	8	17
	N	10	11	17
相関係数	T	0.94	0.97	0.98
	N	0.99	0.98	0.99

表1 近似式の係数 α_1 , 係数 β_1 , ポイントデータ数及び相関係数(背景の輝度0 cd/m²の場合)
Table 1 Coefficient α_1 , β_1 of the approximate formula, number of data and coefficient of correlation (When background condition is 0 cd/m²)

Table 1 Coefficient α_1 , β_1 of the approximate formula, number of data and coefficient of correlation (When background condition is 0 cd/m²)

閃光の角膜照度 (lx)		2.2 × 10 ⁻⁸	8.8 × 10 ⁻⁶	2.0 × 10 ⁻⁴	5.2 × 10 ⁻⁴	1.0 × 10 ⁻³	5.5 × 10 ⁻³	1.1 × 10 ⁻²
係数	被験者							
α_1	M	0.53	0.68	0.77	0.72	0.84	0.63	0.76
	T	0.47	0.72	0.82	0.63	0.56	0.84	0.82
	N	0.81	0.81	0.77	0.65	0.78	0.63	0.69
β_1	M	-15.47	-14.25	-11.91	-11.54	-10.03	-9.15	-8.72
	T	-15.45	-15.29	-12.04	-11.09	-9.66	-9.59	-8.16
	N	-16.57	-14.98	-12.16	-11.52	-10.40	-9.15	-8.26
ポイントデータ数	M	8	6	7	15	6	15	15
	T	13	9	7	14	11	14	8
	N	7	7	6	6	5	14	10
相関係数	M	0.95	0.96	0.98	0.99	0.96	0.98	0.99
	T	0.95	0.97	0.97	0.96	0.98	0.97	0.99
	N	0.99	0.99	0.99	0.91	0.99	0.94	0.94

図7 係数 β_1 と閃光の角膜照度との関係

Fig. 7 Relation between coefficient β_1 and illuminance of a flash light at the observer's eye

図9 係数 α_2 , 係数 β_2 と閃光の角膜照度との関係

Fig. 9 Relation between coefficient α_2 , β_2 and illuminance of a flash light at the observer's eye

図8 閃光の点灯時間に対する実効光度
(背景の輝度が 0 cd/m^2)

Fig. 8 Effective intensity to the duration of a flash light (When background condition is 0 cd/m^2)

背景の輝度が 0 cd/m^2 の場合、閃光の角膜照度が 2.2×10^{-6} , 2.0×10^{-4} , $1.1 \times 10^{-2} \text{ lx}$ の3レベルについて、(4)式で与える実験式及び(1)式を用いた Blondel-Rey 値も含めて実験結果に重ねたものを図8に示す。

4.2.2 背景の輝度 30 cd/m^2 の場合

表2の係数 α_2 及び β_2 の閃光の角膜照度に対する関係を図9に示す。被験者両名ともに閃光の角膜照度が大きくなるにつれて、

係数 α_2 は小さくなる傾向があり、図中の実線が表す次式(5)で近似される。

$$\alpha_2 = 0.25 - 0.05 \times \log_e(X) \quad \text{.....(5)}$$

ここで、 X は閃光の角膜照度 (lx) である。

また、係数 β_2 は閃光の角膜照度の対数と高い相関があり、図中の破線が表す次式(6)で近似される。

$$\beta_2 = -2.5 + 1.1 \times \log_e(X) \quad \text{.....(6)}$$

ここで、 X は閃光の角膜照度 (lx) である。

(2)式に(5)式で示される α_2 及び(6)式で示される β_2 を代入すると、実効光度は次式(7)となる。

$$\log_e(Y) = [-2.5 + 1.1 \times \log_e(X)] + [0.25 - 0.05 \times \log_e(X)] \times \log_e(T) \quad \text{.....(7)}$$

ここで、 Y は実効光度 (lx)、 X は閃光の角膜照度 (lx)、 T は閃光の点灯時間 (msec) である。

背景の輝度が 30 cd/m^2 の場合、閃光の角膜照度が 1.1×10^{-4} , 1.0×10^{-3} , $1.1 \times 10^{-2} \text{ lx}$ の3レベルについて、(7)式で与える実験式を実験結果に重ねたものを図10に示す。

今回の実験では背景の輝度が 30 cd/m^2 の場合のみを行ったが、他の背景の輝度条件についても、さらなる実験の追加が必要であると考ええる。

今回の実験により考察できることは、背景が多少なりとも明るい場合には、背景が 0 cd/m^2 の場合と比べて、閃光の見え方は異なっているといえる。背景輝度と閾値を与える実効光度との関係について、Blondel&Rey の式で計算できるのは背景輝度 1 cd/m^2 以下の夜間の閾値を与える実効光度のみであるとする報告⁷⁾もあり、薄明及び昼間を通じて使用できる実効光度を与える式が検討されなければならないと考える。

4.3 実験式の検討 (背景の輝度 0 cd/m^2 の場合)

本実験に先立ち、スライドプロジェクターに回転スリット及び電子シャッターを取り付けた閃光発生装置を作製し、閃光の点灯時間が 1 msec 付近で、背景の輝度が 0 cd/m^2 の場合の実験を行っている。被験者は、本実験と同じ3名である。被験者は定常光

図10 閃光の点灯時間に対する実効光度
(背景の輝度が30cd/m²)

Fig.10 Effective intensity to the duration of a flash light (When background condition is 30cd/m²)

図11 閃光の点灯時間に対する実効光度
(背景の輝度0cd/m², 閃光の点灯時間1msec近傍の場合)

Fig.11 Effective intensity to the duration of a flash light
(When background condition is 0cd/m² and when the duration of a flash light is about 1 msec)

の電源電圧を変えながら閃光と同じ明るさに見える定常光の明るさを決定する。そして、電源電圧と閃光及び定常光の輝度を測定し、角膜照度に換算したものである。そのようにして求めた結果に実験式(4)を当てはめたものを、閃光の角膜照度レベルに対応させ図11に示す。閃光の点灯時間は、回転スリットの回転数から求めた値である。

その結果、被験者の個人差は大きいものの、それぞれの被験者の平均的な傾向が示すように、実験式(4)に当てはまることが確認される。

5. 結言

閃光の実効光度(角膜照度)を求めるために、閃光の明るさと背景の輝度の諸条件を組み合わせ、被験者が閃光の明るさと等しいと感じられる定常光の明るさを閃光の実効光度とするような実験に基づく本研究をまとめると、次のようになる。

(1) 閃光の実効光度は、背景の輝度が一定の条件であるとき、閃光の角膜照度(lx)と閃光の点灯時間(msec)をパラメータとして、求めることができる。

(2) 背景の輝度が0cd/m²の場合、閃光の実効光度は次の実験式で与えられる。

$$\log_e(Y) = [-4.4 + 0.88 \times \log_e(X)] + 0.7 \times \log_e(T)$$

Y: 実効光度(定常光の角膜照度)(lx)

X: 閃光の角膜照度(lx)

T: 閃光の点灯時間(msec)

(3) 背景の輝度が0cd/m²以外の場合、すなわち背景に明るさがある場合の閃光の実効光度は、背景が0cd/m²の場合とは異なった値となる。

参 考 文 献

- (1) Blondel and Rey "Perception of Lights of short duration at their range limits." Transaction of Illuminating Engineering London, Vol VII No.8 P.625~662 (1912)
- (2) 池田紘一、藤井克人、小原清成: 「Xe 白色閃光の実効光度」, 昭60照学全大, 63, (1985)
- (3) 大山正・今井省吾・和気典二編, 新編感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, p.337, (1994)
- (4) 池田紘一・藤井克人・中山昌春・小原清成: 「閃光灯火の色と実効光度」, 昭61照学全大, 62, (1986)
- (5) 小野 隆, 大野義明, 小木曾淳一, 石井弘允: 「パルス発光光源の実効光度の検討(I)」, 平4照学全大, 88, (1992)
- (6) ネットワーカマガジン編集部/月刊アスキー編集部, 秀作フリーソフトウェア100選 Part 2, (株)アスキー (ISBN4-7561-0541-6), (1994)
- (7) (社)照明学会航空障害標識に関する調査特別研究委員会, 航空障害灯及び障害標識に関する調査(II) 報告書, p.27, (1993)

(受付日1996年7月19日/採録日1997年2月3日)