不均一な輝度分布をもつ灯火の明るさ知覚

正会員 入 倉 隆* 正会員 谷 口 哲 夫* 正会員 青 木 義 郎*

Brightness Perception of a Light with Non-Uniform Luminance Distribution

Takashi Irikura (Member), Tetsuo Taniguchi (Member), Yoshiro Aoki (Member)

(Traffic Safety and Nuisance Research Institute)

ABSTRACT

The brightness perception of a light with non-uniform luminance distribution is not clearly understood, especially at suprathreshold levels. Two experiments were done to clarify this mode of brightness perception. In the first experiment, subjects made brightness matches between a test stimulus with non-uniform luminance distribution and a matching stimulus with uniform luminance distribution. Matches were made as function of background luminance. In the second experiment, brightness matches were made between a multiple-point stimulus and a one-point stimulus as a function of the point and separation.

With respect to the variables of stimulus size and background luminance, the results show that the brightness perception of the non-uniform stimulus and the multiple point stimulus is similar to that of the uniform stimulus. The brightness of the non-uniform stimulus may be obtained with an element-contribution function derived from circular stimuli with uniform luminance distribution. The brightness of the multiple-point stimulus also agrees with the from the element-contribution model at a background luminance of 0 cd/m², but does not agree at a background luminance of 10 cd/m².

1. まえがき

前報¹⁾において、いき上レベルにおける視覚の空間的寄せ集め特性に関する実験を行い、均一な輝度分布をもつ灯火の明るさ知覚について検討した。しかし、実際の信号灯火の輝度分布は必ずしも均一でなく、一般に灯火の中心部の輝度は高く、周辺部ほど低くなっている。特に霧などによる低視程時には、灯火の周りにハローができ、ハロー部分を含む灯火の輝度分布はさらに不均一となる。観測距離が短く、視角が大きい場合、このような灯火の見え方は、均一な輝度分布をもつ灯火や点光源の見え方とは異なると考えられる。また、進入灯、滑走路灯等の飛行場灯火は多数の灯火で構成されていて、その見え方は単一灯火とは異なる。しかしながら今まで信号灯火等の見え方は、それらを単一な点光源として扱い、主に角膜照度により求められてきた。

田淵ら²⁾は、均一な輝度光源と不均一な輝度光源との不快グレアの比較を行い、その輝度分布、視角、背景輝度と不快グレアの関係について求めている。また、Blackwell³⁾は、3個又は5個から成る刺激光の光覚いきは、円刺激光の光覚いきから得られた element-contribution function を用いて求めた値によく一致することを示している。しかし、Sakitt⁴⁾は、2~25個から成る刺激光の光覚いき(暗順応、中心から7°の呈示位置)を求めているが、それ

によると、円形の均一な刺激光の場合にリコーの法則が成り立つ領域においても、複数個から成る刺激光では視覚の空間的寄せ集めは不完全であるという結果を得ている。特に2個から成る刺激光の場合、視角(2個の刺激光の中心の間隔)数分でも、空間的寄せ集めは完全でないことを報告している。Cornsweet⁵⁾らは、Sakittの結果はIDS(intensity-dependent spatial summation)によって説明できるとしている。さらに、小原ら^{6,7)}は、水平方向灯列の灯火数と間隔を変えた場合の必要角膜照度について実験を行い、いき値、適正及びグレア下限に対応する角膜照度(灯列中の1個の灯火による角膜照度)は単一灯火のそれより低くなり、その程度は灯火個数と灯火間隔の関数になることを示している。

しかし、不均一な輝度分布をもつ光や複数個の刺激光から成る光の見え方、特にいき上レベルにおける明るさ知覚については明確にされているとはいえない。本研究では、種々の背景輝度において、均一な輝度分布をもつ基準光と不均一な輝度分布をもつテスト光の明るさのマッチング、さらに単一な刺激光である基準光と複数個の刺激光から成るテスト光の明るさのマッチングを行うことにより、その明るさ知覚について検討した。

2. 実験 I ; 不均一な輝度分布をもつテスト光の明るさに関する実験

2.1 実験装置

基準光及びテスト光の配置を図1に示す。観測距離は5mであり、基準光(円形)の視角は3minである。テスト光は、図2に示すような4つのスリットをもつ形状の開口を約25回/秒(明滅周波

*交通安全公害研究所
三鷹市新川 6-38-1

本論文の一部は、平成5年度照明学会全国大会で発表した。

り、基準光（円形）の視角は3minである。テスト光は、図2に示すような4つのスリットをもつ形状の開口を約25回／秒（明滅周波数は約100Hz）で回転させたものを用いた。テスト光の外径は54minと81minの2種類である。テスト光は、臨界融合周波数(CFF)以上で明滅するため、図3に示すような輝度分布（理論的計算値）をもった刺激光として観測される。これらは、中心部の輝度が高く、周辺にいくにしたがって輝度が低くなっており、低視程時のハローを伴う灯火の見え方に近いものである。基準光、テスト光の光度及び背景輝度は減光フィルター及び光度調整器により自由に変えることができる。

設定背景輝度と基準光光度 I_m を表1に示す。背景輝度 $0\text{cd}/\text{m}^2$ とは背景なしのことである。基準光光度は各背景輝度に対して適正角膜照度となる値である。ここで適正角膜照度とは、被験者にとって、いき値より十分大きく、グレア下限より小さい角膜照度の範囲であり、信号灯等が観測者に対して有効に機能する範囲である。光度及び輝度の測定は、被験者の位置から輝度計を用いて行った。

2.2 実験方法

実験は、以下の手順に示すように調整法により行った。被験者は27～42歳の男性5名、女性1名である。

(1) 被験者は約15分間の暗順応を行う。

図1 基準光及びテスト光の配置
Fig.1 Stimulus configuration

図2 開口の形状
Fig.2 Shape of aperture

図3 テスト光の輝度分布（背景輝度 $0\text{cd}/\text{m}^2$ ）
Fig.3 Luminance distribution of test stimuli.
The background luminance is $0\text{cd}/\text{m}^2$.

表1 背景輝度と基準光光度
Table 1 Background luminance and matching-stimulus intensity

背景輝度 cd/m^2	基準光光度 I_m cd
0	1.3×10^{-4}
0.01	"
0.1	1.6×10^{-4}
1	6.2×10^{-4}
10	3.1×10^{-3}
45	1.8×10^{-2}

- (2) さらに背景輝度で2～3分間の順応を行う。
- (3) 被験者は、中心視で交互に基準光とテスト光を見ながら手元のつまみを調整し、テスト光の明るさが基準光と等しくなるようにする。ただしテスト光の最初の光度は 0cd から始める。
- (4) 測定者がそのテスト光光度を測定する。
- (5) 背景輝度の条件を変える。その背景輝度で2～3分間の順応を行った後、(3)、(4)を繰り返す。
- (6) 開口板の形状を変えて(1)～(5)を行う。

2.3 実験結果

基準光と等しい明るさのテスト光光度を I_t とし、各実験条件における被験者6名の評価の平均値より求めた I_t/I_m と背景輝度の関係を図4に示す。図中の縦線は標準偏差を示す。ここで I_t 及び I_m は、図5に示すように背景光を除いた値である。

図4より、 I_t/I_m は背景輝度 $1\text{cd}/\text{m}^2$ ($0\log\text{cd}/\text{m}^2$) のとき極小となり、 $1\text{cd}/\text{m}^2$ 以上では背景輝度とともに上昇していることが分かる。背景輝度 $1\text{cd}/\text{m}^2$ 以上における特性は、背景輝度が高くなるにしたがって、テスト光の周辺部に対する空間的寄せ集め効果が小さくなるためであると考えられる。均一なテスト光の場合、 $\log(\text{背景輝度})$ と $\log(I_t/I_m)$ がほぼ直線関係にあり、本実験結果のような背景輝度 $1\text{cd}/\text{m}^2$ での I_t/I_m の低下は観測されていない¹⁾。これは不均一な輝度分布をもつ光の明るさには、視覚の空間的寄せ集め以外の要因も加わっていると考えられる。 $1\text{cd}/\text{m}^2$ は、薄明視と明所視の境界付近であり、かん体順応、すい体順応の影響があるようにも考えられるが、これについてはさらに

図4 I_t/I_m と背景輝度との関係 (均一な輝度分布をもつテスト光)
Fig.4 Relation between I_t/I_m and background luminance. (Test-stimuli with non-uniform distribution).

図5 I_m 及び I_t の値
Fig.5 Value for I_m and I_t .

実験・検討を要する。また外径81minのテスト光が54minに比べて I_t/I_m が大きくなっている。これは均一なテスト光の場合と同じく、テスト光の中心からの距離が大きくなるにしたがって、空間的寄せ集め効果が小さくなるためであると考えられる。テスト光が基準光と同じ明るさに見えるためには、背景輝度0cd/m²のとき外径81minのテスト光で基準光の4.5倍、外径54minで3.3倍、又背景輝度10cd/m²のとき外径81minのテスト光で6.4倍、外径54minで4.8倍の光度が必要である。

基準光の輝度を L_m 、基準光と明るさが等しいと評価したときのテスト光の中心部の輝度を L_t とし、 L_t/L_m と背景輝度との関係を求めた結果を図6に示す。

背景輝度が高くなるにしたがって L_t/L_m は大きくなる。また、 L_t/L_m は1より小さく、テスト光の明るさはその不均一な部分の影響を大きく受ける。背景輝度が0cd/m²のとき外径81minのテスト光では L_t/L_m は0.19、54minでは L_t/L_m は0.20、背景輝度が10cd/m²のとき外径81minのテスト光では L_t/L_m は0.30、54minでは L_t/L_m は0.32となっている。

このことより、霧中における灯火では、ハロー部分の明るさが灯火全体の明るさに大きく影響してくることが考えられる。今まで、ハロー部分を除いた灯火の中心部分のみの光度を Allard の式により計算し、いき値、適正光度、グレア下限等を求めていた。しかし、この結果よりハロー部分も含めて灯火の明るさを求める必要があることが分かる。特に背景輝度の低い夜間やハローの輝

図6 L_t/L_m と背景輝度との関係
Fig.6 Relation between L_t/L_m and background luminance.

図7 テスト光のパターン (パターン5×5間隔4min)

Fig.7 Test-stimulus pattern is 5×5, and the interval is 4min.

度が高くなるときには、これを考慮する必要がある⁸⁾。

3. 実験II；複数個の刺激光から成るテスト光の明るさに関する実験

3.1 実験装置

基準光及びテスト光の配置と観測距離は実験Iと同じである。基準光 (円形) の視角は1minであり、点光源とみなすことができる。テスト光は図7に示すように視角1minの刺激光をマトリックス状に並べてある。テスト光を構成する刺激光の個数とその間隔を表2に示す。その他の実験装置は実験Iと同じである。

設定背景輝度と基準光光度 I_m を表3に示す。基準光光度は各背景輝度に対して適正角膜照度となる値である。

3.2 実験方法

実験は、以下の手順に示すように調整法により行った。被験者は27～43歳の男性3名である。

(1)～(4)は実験Iと同じ。

表2 テスト光を構成する刺激光の個数と間隔

Table 2 Number and separation of stimuli

テスト光パターン (刺激光個数)	間隔 min
3 × 3 (9)	2, 4, 8, 16, 32
5 × 5 (25)	2, 4, 8, 16
7 × 7 (49)	2, 4, 8

表3 背景輝度と基準光光度

Table 3 Background luminance and matching-stimulus intensity

背景輝度 cd/m ²	基準光光度 I _m cd
0	6.8 × 10 ⁻³
10	5.1 × 10 ⁻²

- (5) テスト光のパターンを変えて(3), (4)を繰り返す。テスト光のパターンの呈示順序はランダムとし、すべてのパターンを2回通り繰り返す。
- (6) 背景輝度を変えて(2)~(5)を繰り返す。

3.3 実験結果

基準光と等しい明るさのテスト光光度 (テスト光を構成する刺激光全体の光度) を I_t とし、各実験条件における被験者3名(6回)の評価の平均値より求めた I_t/I_m と刺激光間隔の関係を図8

に示す。図中の縦線は標準偏差を示す。

図8より、テスト光を構成する刺激光の間隔が大きくなるにしたがって、また刺激光の数が多くなるにしたがって I_t/I_m は大きくなる事が分かる。これは、刺激光の間隔又は数が大きくなるにしたがって、テスト光の大きさが大きくなり、視覚の空間的寄せ集めが小さくなるためであると考えられる。さらに、背景輝度10cd/m²における I_t/I_m の値は0cd/m²のときの値より大きくなっている。これは、背景輝度が高くなるにしたがって、テスト光の周辺部に対する空間的寄せ集め効果が小さくなるためであると考えられる。間隔2minの場合、テスト光の大きさは6min(パターン3×3)~17min(パターン7×7)であるが、 I_t/I_m は1より大きくなっており、背景輝度10cd/m²、パターン7×7のとき I_t/I_m は5.7となっている。つまり視角10min程度において、すでに空間的寄せ集めは不完全である。均一な円形のテスト光における実験結果でも視角10min付近から空間的寄せ集めは不完全となり始めており、これとはほぼ同様な傾向を示している。

テスト光が基準光と同じ明るさに見えるためには、背景輝度0cd/m²のとき間隔2min、3×3のパターンのテスト光で基準光の1.3倍、間隔8min、7×7のパターンで6.3倍、又背景輝度10cd/m²のとき間隔2min、3×3のパターンで2.1倍、間隔8min、7×7のパターンで13倍の光度が必要である。

基準光と明るさが等しいと評価したときのテスト光の1刺激光の光度を I_n とし、 I_n/I_m と刺激光間隔との関係を求めた結果を図9に示す。テスト光を構成する刺激光の間隔が大きくなるにしたがって I_n/I_m は大きくなり、刺激光の数が多くなるに

(a) 背景輝度 0 cd/m²

(b) 背景輝度 10 cd/m²

図8 I_t/I_m と刺激光間隔の関係
Fig.8 Relation between I_t/I_m and stimulus interval.

(a) 背景輝度 0 cd/m²

(b) 背景輝度 10 cd/m²

図9 I_n/I_m と刺激光間隔の関係
Fig.9 Relation between I_n/I_m and stimulus interval.

10cd/m²における I_n/I_m の値は0cd/m²のときの値より大きくなっている。 I_n/I_m は、背景輝度0cd/m²のとき間隔32min, 3×3のパターンのテスト光で0.36, 間隔2min, 7×7のパターンで0.069, 又背景輝度10cd/m²のとき間隔32min, 3×3のパターンで0.58, 間隔2min, 7×7のパターンで0.12である。

4. 考察

Blackwell³⁾は、空間的寄せ集め特性を定量化するために、受容野を表す element-contribution function $\psi(r)$ を提案した。そして円形刺激光の大きさといき値に関する実験結果から $\psi(r)$ を求めている。円形の刺激光による神経細胞での反応の大きさは、 $\psi(r)$ を用いると(1)式によって求めることができる。

$$2\pi L_o \int_0^R r \psi(r) dr \quad (1)$$

ただし、 L_o : 刺激光の輝度

R : 刺激光の半径

r : 刺激光の中心からの距離

前報¹⁾の結果より、いき上レベルにおける中心窩での $\psi(r)$ を求めると図10のようになる。いき値実験と同様にテスト光の中心から遠ざかるにしたがって $\psi(r)$ は小さくなり、また背景輝度が高くなるほど小さくなる。また、 $\psi(r)$ が負になる領域はなく、つまり抑制現象は現れていない。テスト光の中心における $\psi(r)$ を1とすると、中心からの距離が1min くらいまでの位置では $\psi(r)$ はほぼ1であるが、10min の位置では背景輝度0cd/m²で0.4, 背景輝度10cd/m²で0.01となっている。

element-contribution function $\psi(r)$ を用い、(1)式により、不均一な輝度分布 $L(r)$ を持つテスト光と等しい明るさの点光源の光度 I_o を求めることができると仮定すると、

$$I_o = 2\pi \int_0^R r \psi(r) L(r) dr \quad (2)$$

となる。また、

$$I_t/I_m = (I_t/I_o) \cdot (I_o/I_m)$$

図10 いき上レベルにおける中心窩での element-contribution function
Fig.10 Element-contribution function in the central fovea at suprathreshold level.

が成り立つとすると、(2)式より I_t/I_m を求めることができる。また、複数個の刺激光から成るテスト光と等しい明るさの点光源の光度 I_o ($I_o = I_m$) も同様な考え方から求めることができる。

これにより求めた I_t/I_m と実験 I による I_t/I_m との比較を図11, 12に示す。element-contribution function より求めた I_t/I_m と実験 I による I_t/I_m は、外径54min 及び外径81min のテスト光とも比較的近い値であると考えられる。テスト光の輝度分布を変えてさらに実験を行ってみる必要があるが、不均一な輝度分布をもつ刺激光の明るさは、均一な輝度分布をもつ刺激光の明るさから求めた element-contribution function を用いることにより推定できるものと考えられる。

複数個の刺激光から成るテスト光について element-contribution function より求めた I_t/I_m と実験 II による I_t/I_m との比較を図13, 14に示す。Blackwell³⁾は、3個又は5個から成る刺激光の光覚いきは、円刺激光の光覚いきから得られた element-contribution function を用いて求めた値によく一致することを示

図11 element-contribution function より求めた I_t/I_m と実験による I_t/I_m の比較 (不均一な輝度分布をもつテスト光, テスト光外径: 54min)
Fig.11 Comparison of I_t/I_m obtained from experiment results and I_t/I_m obtained with element-contribution function. (Test-stimulus with non-uniform distribution. The outside diameter is 54 min.)

図12 element-contribution function より求めた I_t/I_m と実験による I_t/I_m の比較 (不均一な輝度分布をもつテスト光, テスト光外径: 81min)
Fig.12 Comparison of I_t/I_m obtained from experiment results and I_t/I_m obtained with element-contribution function. (Test-stimulus with non-uniform distribution. The outside diameter is 81 min.)

図13 element-contribution function より求めた I_t/I_m と実験による I_t/I_m の比較 (複数の刺激光からなるテスト光, 背景輝度: 0 cd/m²)
Fig.13 Comparison of I_t/I_m obtained from experiment results and I_t/I_m obtained with element-contribution function. (Multiple-point stimuli. The background luminance is 0 cd/m².)

している。背景輝度10fL (約34cd/m²), 刺激光間隔3.6~28.6min, 両眼視, 中心において, その差は平均で5~7%であるとしている。しかし, いき上レベルにおける element-contribution function より求めた I_t/I_m と実験による I_t/I_m は, 背景輝度0cd/m²の場合 (特に3×3及び5×5のパターン) はよく一致しているが, 10cd/m²の場合は element-contribution function より求めた I_t/I_m が実験による I_t/I_m に比べて明らかに大きくなっている。つまり背景輝度10cd/m²の場合の明るさは, element-contribution function より求めた値に比べて大きくなる。このような条件における複数の刺激光から成る光の明るさ知覚には, 単に視覚の空間的寄せ集めだけでなく, 刺激光の配置が何らかの要因として働いた結果であると考えられる。

5. まとめ

種々の背景輝度において, 均一な輝度分布をもつ基準光と不均

一な輝度分布をもつテスト光の明るさのマッチング, さらに単一な刺激光である基準光と複数の刺激光から成るテスト光の明るさのマッチングを行うことにより, その明るさ知覚について検討した。これらの結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 不均一な輝度分布をもつテスト光及び複数の刺激光から成るテスト光の明るさと均一な輝度分布をもつ刺激光の明るさは, 刺激光の大きさ及び背景輝度に関して同じような特性を持つ。
- (2) 不均一な輝度分布をもつ刺激光の明るさは, 均一な輝度分布をもつ刺激光の明るさから求めた element-contribution function を用いることにより推定できるものと考えられる。
- (3) 複数の刺激光から成るテスト光の明るさは, 背景輝度0cd/m²の場合 element-contribution function より求めた値に比較的よく一致しているが, 10cd/m²の場合は element-contribution function より求めた値に比べて大きくなる。

(a) パターン 3×3

(b) パターン 5×5

(c) パターン 7×7

図14 element-contribution functionより求めた I_t/I_m と実験による I_t/I_m の比較 (複数個の刺激光からなるテスト光, 背景輝度: 10cd/m^2)

Fig.14 Comparison of I_t/I_m obtained from experiment results and I_t/I_m obtained with element-contribution function. (Multiple-point stimuli. The background luminance is 10cd/m^2 .)

最後に、本研究を実施するにあたり協力いただいた航空局の関係者及び被験者の方々に感謝いたします。

(受付 1993年2月25日/採録 1993年8月10日)

参考文献

- (1) 入倉, 谷口, 青木: いき上レベルにおける視覚の空間的寄せ集め特性が灯火の明るさ知覚に及ぼす影響, 照学誌76-2, pp.90-94(平5)
- (2) 田淵, 中村, 筒井, 西村, 佐土根: 中心視野の均一輝度光源と不均一輝度光源による不快グレアの比較, 照学全大 p.131(平3)
- (3) Blackwell, H.R.: Neural Theories of Simple Visual Discriminations. J. Opt. Soc. Am. 53-1 pp.129-160(1963)
- (4) Sakitt, B.: Configuration Dependence of Scotopic Spatial Summation. J. Physiol. 216 pp.513-529(1971)
- (5) Cornsweet, T.N. and Yellott, J.I.: Intensity-dependent Spatial Summation. J. Opt. Soc. Am. A. 2-10 pp.1769-1786(1985)
- (6) 小原, 池田, 中山: 水平方向灯列の灯火間隔と見え方, 照学全大 pp.72-73(昭52)
- (7) 小原, 池田, 中山: 水平方向灯列の灯火間隔と見え方(II), 照学全大 pp.68-69(昭53)
- (8) 照明学会: 閃光式航空障害灯調査報告書 pp.37~39(昭52)

いりくら たかし
入倉 隆 (正会員)

昭和31年5月12日生まれ。昭和54年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。昭和57年4月運輸省交通安全公害研究所入所。現在同研究所主任研究官。航空照明の研究に従事。日本光学会、北米照明学会会員。

たにくち てつお
谷口 哲夫 (正会員)

昭和24年9月28日生まれ。昭和51年3月富山大学大学院工学研究科機械工学修士課程修了。同年4月運輸省交通安全公害研究所に入所。平成2年4月同研究所航空研究室長。航空照明の研究に従事。日本機械学会会員。

あおき よしろう
青木 義郎 (正会員)

昭和39年12月13日生まれ。昭和62年3月横浜国立大学工学部電気工学科卒業。昭和63年4月運輸省交通安全公害研究所入所。現在に至る。航空照明の研究に従事。日本シミュレーション学会会員。