

LED 警光灯の視認性向上のための感性指標に基づく 点滅パターン解析*

白 岩 史** 飛 谷 謙 介*** 下 斗 米 貴 之† 猪 目 博 也***
藤 澤 隆 史†† 饗 庭 絵 里 子***,†††,†††† 長 田 典 子*** 北 村 泰 彦***

An Analysis of the Flickering Patterns of LED Warning Lights for Visibility Improvement
Based on Psychophysical Measurements

Aya SHIRAIWA, Kensuke TOBITANI, Takayuki SHIMOTOMAI, Hiroya INOME,
Takashi X. FUJISAWA, Eriko AIBA, Noriko NAGATA and Yasuhiko KITAMURA

Recently, the number of emergency vehicles equipped with light-emitting diode (LED) warning lights has increased. Unlike traditional beanie lights, LED warning lights can display various flickering patterns because these patterns are controlled by computers. The purpose of this study was to develop flickering patterns that had a high level of visibility. Lighting time (ON time), no-lighting time (OFF time), light intensity and rising time (UP time) were controlled by a microcomputer. Further, the visibility of each LED flickering pattern was evaluated quantitatively. Specifically, the visibility of the flickering patterns using the psychophysical measure of “conspicuity (easy to stand out)” from Bradley-Terry paired comparison model was identified. Results showed that OFF time had a significantly greater influence on visibility than ON time. Moreover, the flickering pattern with 66 msec of OFF time provided optimal visibility, regardless of the ON time, by making the visibility map, which represented the degree of visibility between ON time and OFF time. Therefore, the ideal combination between ON time and OFF time was determined.

Key words: visibility, conspicuity, LED, flickering pattern, Bradley-Terry paired comparison model

1. 緒 言

緊急走行中の緊急車両(救急車・消防車・パトロールカーなど)は、早急に目的地に到着するため、赤信号であっても交差点を通過したり右側を走行したりする場合がある。その際、発生する恐れのある問題として、緊急車両と一般車両の衝突事故が挙げられる。これらの事故の原因は、緊急車両が一般車両に早期に認知されていないためであると考えられる。また、平成23年度の総務省消防庁による「平成24年版救急・救助の現状」¹⁾によると、救急車の到着所要時間も年々増加している。この増加要因のひとつとして、自動車社会の発展によって交通量が増加しているため、緊急車両を視認しにくくなっている可能性が挙げられる。

このような状況の中、緊急車両の走行支援装置である警光灯には、これまで回転灯が用いられてきたが、近年、発光ダイオード(LED: light-emitting diode)を用いたものが増えている。LEDは、電球に比べて、光の広がり小さく、直進する性質を持っているため、遠方からでも、その光を確認しやすいという性質を持つ。また、LED警光灯は、回転灯と異なり、光の点滅具合、

すなわち点滅パターンを、コンピュータを介して自由に設計できるという利点がある。しかしながら、警光灯の製造現場では、従来の点滅パターンを踏襲する形で設計が行われているのが実情である。それ故に、緊急走行を円滑に行い、また走行中の事故を極力減らすためにも、視認性の高い点滅パターンの設計が求められている。

本研究では、安全性向上のため、視認性の高いLED警光灯点滅パターンの開発を目的とし、点灯時間、滅灯時間、光強度、立ち上がり時間を様々な組み合わせることによって、点滅パターンの視認性評価実験を行う。

2. 先行研究

光刺激の視認性に関する研究は、これまで、表示文字や標識・サインなどの視覚標識物に関して多くの研究が行われてきた^{2)~9)}。なお、視認性とは対象物の見やすさの程度と定義されている¹⁰⁾。

表示文字における視認性は、主に“読みやすさ(可読性)”や“目立ちやすさ(誘目性)”の観点から、文字の大きさ・輝度・色彩・色の組み合わせなどが可読性や誘目性に及ぼす影響や、観測者側の年齢や視覚特性との関係が議論されている。例えば、交通表示で使用されるような、LEDをドットマトリクス状に並べた情報表示板の文字色と背景色の組み合わせから可読性や誘目性を向上させる研究も行われている³⁾。この研究では、輝度の高い色の面積を大きくすることや、赤を含む色を使用することによって誘目性が、青や黒の背景を使用することによって可読性が向上することが報告された。さらに、可読性と誘目性には、トレードオフの関係があることが示されている。

視覚標識物における視認性は、主に“見つけやすさ(可視性)”

* 原稿受付 平成25年5月1日
** 正会員 関西学院大学大学院理工学研究科/感性価値創造研究センター(兵庫県三田市学園2-1)
*** 非会員 関西学院大学大学院理工学研究科/感性価値創造研究センター(兵庫県三田市学園2-1)
† 非会員 玉川大学脳科学研究所(東京都町田市玉川学園6-1-1)
†† 非会員 福井大学子どものこころの発達研究センター(福井県吉田郡永平寺町松岡下合月23-3)
††† 非会員 産業技術総合研究所関西センター(大阪府池田市緑丘1-8-31)
†††† 日本学術振興会

の観点から、環境の影響や色彩の影響について調べられている。例えば、濃霧中における色知覚に関する研究では、霧発生装置を用いて実験を行い、霧の濃度が高くなるに従って、物体の見かけの色が明度および彩度の双方において減少し、さらに、その傾向は、表面照度が低下するに従ってより顕著に表れることが確認された^{4) 5)}。同様に、夜間での LED 式屋外表示装置において、装置に微弱な背景光を照射し、呈示情報とのコントラストを 1:4 から 1:100 の範囲に調整することで、視認性が向上することが報告されている⁶⁾。

さらに、LED の目立ちやすさについて、昼間に比べて夜間では色の影響が大きく、周辺視において青色の存在認知(あるかないか)が良く、赤色の形状認知(どんな形か)が良いことが示唆されている^{7) 8)}。特に、視程 5~25 m 程度の霧の環境下では、LED 青色光の閾値が比較的低いことが確認されている⁹⁾。

一方、点滅する光刺激に関しては、1997 年に起こった「ポケモン事件」をきっかけに、高周波の点滅光が脳活動に影響を与えることが明らかになってきた^{11)~14)}。点滅周波数に対しては、脳の反応は 10~15 Hz で最も顕著になる。「ポケモン事件」では、赤・青の複数刺激が多用されていたのに加えて、この場面の点滅周波数が、この範囲であったことも要因とされている¹⁴⁾。

これまでに、LED の点滅パターンと視認性の関係に着目した研究はほとんどない^{15)~17)}。先行研究では、周波数と視認性を論じたものがあり、感性評価によって、点滅周波数 2 Hz と 5 Hz の光刺激が目立つ傾向にあると報告されている⁷⁾。しかしながら、目立ちやすいという感性指標が、気づきやすい、すなわち反応時間の短縮と関係があるかという点については、明らかになっていない。また、周波数表現では、点灯時間と滅灯時間が異なる点滅光を表現することはできない。「目立ちやすさ」の要因を詳細に特定するためには、点灯時間と滅灯時間を別々に考慮する必要があると考えられる。

我々はこれまでに、コンピュータグラフィックス (CG) を用いて 11 種類の模擬点滅パターンを作成し、心理尺度構築実験により、各パターンの「目立ちやすさ(誘目性)」という心理尺度値を算出した。その後、心理尺度実験結果の上位 5 種類のパターンを用いて、反応時間取得実験を行った。その結果、点滅パターンの違いによって「目立ちやすさ」という視認性に差が生じること、また視認性の心理尺度と実際の反応速度(すなわち「気づきやすさ」)に高い相関があることが確認された¹⁸⁾。

本研究では、次のステップとして、実際の LED とマイコンを用いて、点滅時間(点灯時間、滅灯時間)や点滅波形(立ち上がり時間)など、各種点滅条件を細かく制御して、視認性評価実験を行う。これにより、視認性(目立ちやすさ: 誘目性)と点滅パラメータとの関係を明らかにし、目立ちやすさにおいて最適な点滅パターンを設計することを目的とする。

3. 点滅パターンに関する一対比較

3.1 実験目的

本研究の目的は、目立ちやすい LED 点滅パターンを設計することである。そのために、各種点滅パラメータを組み合わせた点滅パターンに対して、視認性(誘目性)の評価を行った。点滅パターンに関する各条件について、その影響を「どちらが目立ちやすいか」という一対比較により評価した。

なお、本実験は、人間工学会の「人間工学研究のための倫理指針」および関西学院大学における「人を対象にした臨床・調査・実験研究倫理規定」に基づいて実施した。

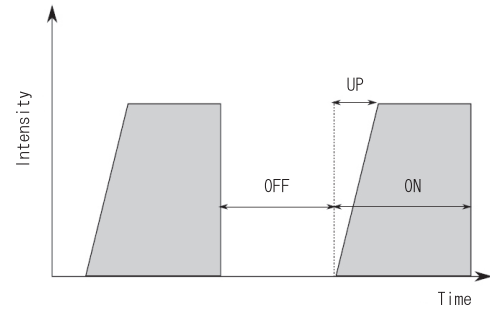


Fig. 1 Parameter of flickering patterns

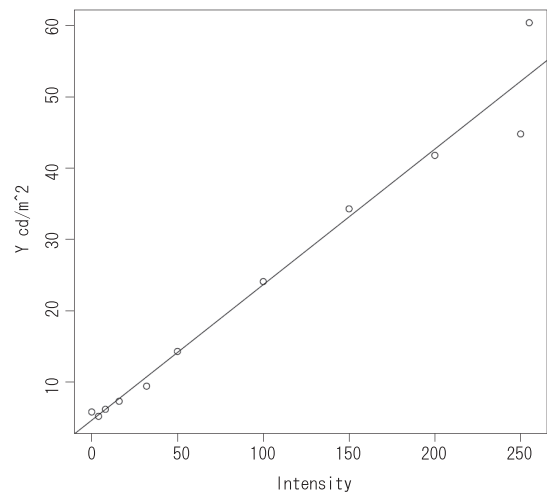


Fig. 2 Relationship between LED's light intensity and luminance

3.2 実験方法

3.2.1 実験参加者

実験参加者は、83 名(女性 21 名、平均年齢 22.3±2.64 歳)である。このうちの 7 名は、予備実験にも参加している。なお、実験参加者の視力は、両眼とも 0.7 以上であった。

3.2.2 実験装置

実験刺激として、汎用 LED (SDL-5N3RGB-C, SANDER) を用いて、赤色の点滅パターンを呈示した。また、LED は、PC (Eee PC901, ASUS; VAIO VGN-TX91PS, SONY) で制御した。

3.2.3 実験刺激

実験刺激として用いた LED 点滅パターンは、点灯時間 (ON: 33, 66, 99, 132 msec), 滅灯時間 (OFF: 33, 66, 99, 132, 165 msec), 光強度 (Intensity: 50, 100, 150, 200, 250 [1/255]), 立ち上がり時間 (UP: 0, 33, 66, 99, 132 msec) の 4 条件をランダムに組み合わせて呈示した (図 1)。ただし、立ち上がり時間に関しては、例えば、点灯時間 33 msec に対する立ち上がり時間は 0 msec または 33 msec とするように、点灯時間を超えないよう設定した。

LED の光強度の変化は、1 kHz パルス幅変調 (PWM; pulse width modulation) のデューティ比によって制御した。最大値 255 (8 bit) でデューティ比 1 となる。背景輝度は平均 5.27 cd/m² であった。LED の輝度は、LED から 1 m 離れた位置から輝度計 (CHROMA METER CS-100A, MINOLTA) によって計測した。図 2 に LED の光強度と輝度の関係を示す。横軸は LED の光強度、縦軸は LED の輝度である。

3.2.4 実験環境

図3に実験環境の概念図を示す。実験参加者は一名ずつ椅子に腰かけ、実験を行った。実験室内の照明は消されており、LED刺激光および後述するプロジェクタからの背景の投影による光の下で、実験参加者は課題を行った。

本研究では、先行研究¹⁸⁾に引き続き、運転中であることを仮定して、実験環境や実験条件を決定した。背景については、幅広い視野角(-45°~45°)を実験対象とするために、比較する2つのLEDの約2m後方にスクリーンを設置し、そこに背景をプロジェクタによって投影した。投影した映像は、運転席から見える市街地の映像を実際に撮影して、映像1フレームごとに、画素位置をランダムに変えたものをランダムな順に呈示した。その輝度は平均5.27 cd/m²であった。こうすることにより、一見、グレースケールのノイズ画像のように見えるが、実際には、各画素がRGB成分を持つカラー画像が投影されている。これにより、運転時の周囲の環境と物理量は同じであるが、背景内の被写体に依存しない背景画像を呈示することができる。

比較する2つのLEDは、左右に120mm離して配置した。これは、LED間の距離が近いと、両方のLED光が視野空間的に干渉し合う恐れがあるためである。また、LEDは目から500~700mmの距離で、視線位置に設置した。なお、この距離において、2つのLEDは、どちらか一方に注意を向けた際に、他方のLEDがマリオットの盲点¹⁹⁾に入らないように調節されている。

実験では、左右に異なる点滅パターンを呈示した。また、パターン対の呈示順および左右の呈示順はランダムであった。

また、LEDの点滅パターンの呈示時間や評価時間に制限はなく、実験参加者が各点滅パターン対に対する評価を決定するまで、それぞれの条件でLEDを点滅させた。

3.2.5 実験課題

実験の課題は、左右のLEDの点滅パターンの目立ちやすさを、一対比較により6段階で評価することであった。「非常にこちら(左)」、「こちら(左)」、「ややこちら(左)」、「ややこちら(右)」、「こちら(右)」、「非常にこちら(右)」の6段階を用いた。

実験1セットは点滅パターン50対(50試行)であり、各実験参加者は実験1セットを行った。試行数は、実験参加者の疲労を考慮し、1人の実験時間を10分以内に納めるため、50試行に決定した。実際の実験時間は8分程度であった。実験1セットは連続して行われた。

なお、今回対象とする点滅パターンは全350パターンであり、これらの反応速度を測定すると実験規模が大きくなる。効率的なパターン対を呈示するために、予備実験を行った。本実験と同様に一対比較で点滅パターンの評価を行い、その結果に対してFisher情報量²⁰⁾を利用して、50対を決定した。これら50対を評価することで、全点滅パターンを評価することができる。

3.3 解析方法

実験では、先行研究¹⁸⁾に則り、それぞれの点滅パターン対に対して、一対比較により6段階で評価を行った。実験データから、点滅パターンへの評価に対する個人のばらつきが小さいことが確認できたので、実験データの解析には、Bradley-Terryの一対比較モデル²¹⁾を使用した。このため、実験データは、左右の2値に変換した。

Bradley-Terryの一対比較モデルは、

$$\pi_{ij} = \frac{\pi_i}{\pi_i + \pi_j} = \frac{1}{1 + \exp(\theta_j - \theta_i)} \quad (1)$$

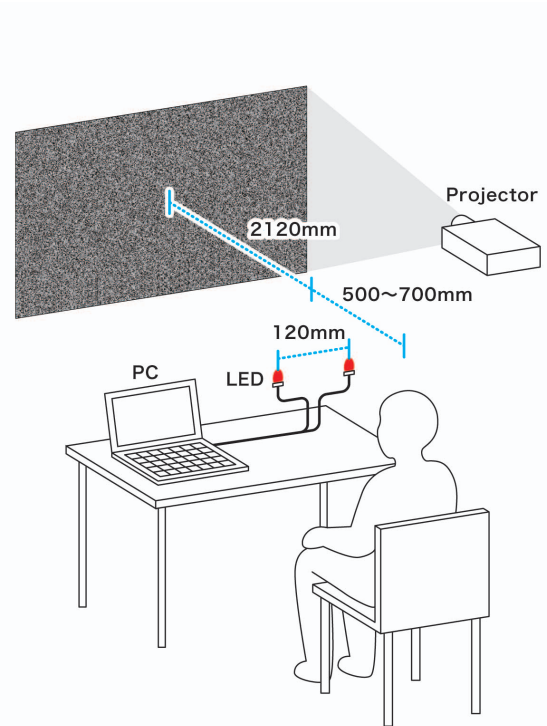


Fig. 3 Experimental environment

により、パラメータ $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}$ を最尤推定法で求める。ただし、 π_{ij} はパターン i と j の対で、 i が選択される確率である。 π_i は、

$$\pi_i = \exp \theta_i \quad (2)$$

である。ここで求められるパラメータ θ_i は、パターン i に関する視認性の感覚量に相当する。すなわち、実験データからのパラメータ推定により、各点滅パターンの視認性の感覚量を推定する。

点灯時間、滅灯時間、光強度、立ち上がり時間の各要因が、視認性の感覚量を表すパラメータ θ に及ぼす影響を調査するために、単回帰分析と分散分析を行った。分析には GNU R (ver.2.8.1)²²⁾を使用した。

3.4 実験結果

説明変数をそれぞれ、点灯時間、滅灯時間、光強度、立ち上がり時間、従属変数をパラメータ θ として単回帰分析を行った。単回帰分析とは、2つの変数間に因果関係が想定される際に、実際に因果関係があるかどうかを解析する手法である。本解析の場合、点灯時間、滅灯時間、光強度、および立ち上がり時間と、視認性の感覚量に相当するパラメータ θ 間の因果関係を検討する。因果関係があるということは、説明変数(本解析の場合、点灯時間、滅灯時間、光強度、立ち上がり時間)から従属変数(パラメータ θ)を予測できることを意味する。

単回帰分析の結果、点灯時間に関しては有意な傾きが見られなかった。すなわち、点灯時間とパラメータ θ の間には、因果関係があるとは言えない。滅灯時間 ($a = -1.31 \times 10^{-2}$, $p < 0.001$), 光強度 ($a = 2.01$, $p < 0.001$), および立ち上がり時間 ($a = -9.22 \times 10^{-3}$,

$p < 0.001$) に関しては有意な傾きが見られた。すなわち、滅灯時間、光強度、立ち上がり時間に関しては、パラメータ θ との間に因果関係がある可能性がある。図 4 に、それぞれの結果を示す。横軸はそれぞれ、滅灯時間 (OFF), 光強度 (Intensity), 立ち上がり時間 (UP) であり、縦軸はパラメータ θ である。なお、相対比較を元としているため、パラメータ θ は通常、水準値が定まらない。そのため、この分析において、図 4(b) に示す光強度のグラフは切片 0 となるよう設定している。図 4(a), 図 4(c) において、強度は視認性パラメータに対して対数の比例関係にあるという仮定のもとに強度の影響を除去し、 $\theta_{corrected}$ と補正している。図中の白丸は外れ値である。

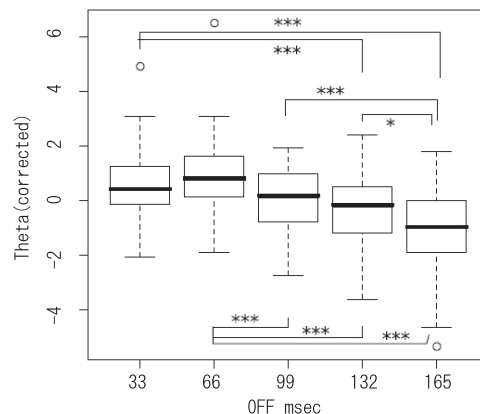
また、単回帰分析と同様に、説明変数をそれぞれ、点灯時間、滅灯時間、光強度、立ち上がり時間、従属変数をパラメータ θ として 4 要因分散分析を行った。分散分析とは、観測データの変動を、誤差の変動と各要因による変動、要因間の交互作用による変動に分解することにより、要因の効果や交互作用の効果を解析する手法である。

分散分析の結果では、点灯時間に有意な主効果は示されなかった。主効果とは、それぞれの説明変数が、独自に従属変数へ与える効果のことであり、有意な主効果があるということは、ある説明変数のそれぞれの水準間で、従属変数へ与える効果が異なることを意味する。従って、本解析の場合、単回帰分析の結果と同様に、点灯時間は、視認性の感覚量に相当するパラメータ θ へ影響を及ぼしているとは言えない。

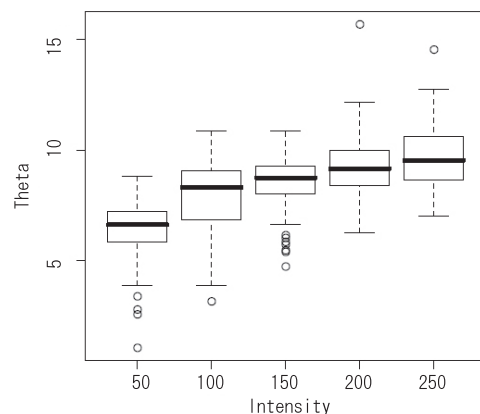
滅灯時間 ($F(1, 334) = 131.55, p < 0.001$)、光強度 ($F(1, 334) = 457.46, p < 0.001$)、および立ち上がり時間 ($F(1, 334) = 40.52, p < 0.001$) については有意な主効果があった。すなわち、滅灯時間、光強度、立ち上がり時間に関しては、パラメータ θ へ何らかの影響を及ぼしている可能性が考えられる。

交互作用については、点灯時間 \times 滅灯時間に関して有意となった ($F(1, 334) = 6.36, p < 0.05$)。交互作用とは、説明変数を組み合わせた場合の複合効果のことであり、例えば、各要因の主効果だけでは説明できない組み合わせ特有の効果を意味する。図 5 に、点灯時間と滅灯時間に関する視認性マップを示す。図 5 では、立ち上がり時間を考慮せずに、点灯時間と滅灯時間の各組み合わせに対するパラメータ θ を平均している。なお、目立つと評価された点滅パターンほど、薄い色で表されている。本解析の場合、点灯時間はパラメータ θ に影響を及ぼしているとは言えなかったが、図 5 から分かるように、滅灯時間と組み合わせることにより、特に点灯時間 33~100 msec、滅灯時間 33~66 msec 周辺に、視認性のピークがあることが確認でき、点灯時間と滅灯時間の組み合わせにより、視認性への影響が異なっていることが分かる。

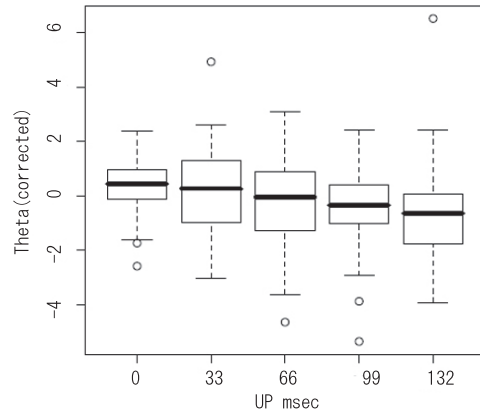
また、滅灯時間 \times 立ち上がり時間に関しても、有意な交互作用が見られた ($F(1, 334) = 16.71, p < 0.01$)。立ち上がり時間に関する交互作用について調べるため、立ち上がり時間 0, 33, 66 msec の場合の視認性マップを作成した (図 6)。なお、立ち上がり時間は点灯時間を超えないように設定しているため、図 6(c) では、点灯時間 66 msec 未満のデータは存在しない。図 6(a), 図 6(b) より、立ち上がり時間 0 msec から 33 msec にかけて、視認性のピークの位置が変動していることが分かる。すなわち、立ち上がり時間 0 msec の場合 (図 6(a)), 点灯時間 33 msec、滅灯時間 66 msec 部分に、立ち上がり時間 33 msec の場合 (図 6(b)), 点灯時間 100 msec、滅灯時間 33~66 msec 部分にピークがあることが確認できる。さらに、立ち上がり時間 66 msec の場合 (図



(a) Effects of no-lighting (OFF) time



(b) Effects of intensity



(c) Effects of rising time (UP)

Fig. 4 Effects of no-lighting (OFF) time, Intensity, and rising time

6(c)), 点灯時間 80~100 msec、滅灯時間 66 msec 部分に、ピークがあることが分かる。従って、視認性のピークの位置は変動しているが、点灯時間だけでなく、立ち上がり時間に関しても、滅灯時間 66 msec 周辺にピークがあることが分かった。

4. 考 察

単回帰分析の結果から、光の強度と視認性 (誘目性) に関する相関関係 (因果関係) が明らかとなり、直観と矛盾しない結果を得た。

立ち上がりの効果に関しては、単回帰分析で負の効果が観測された。立ち上がり時間の逆数が変化量に対応するため、強度

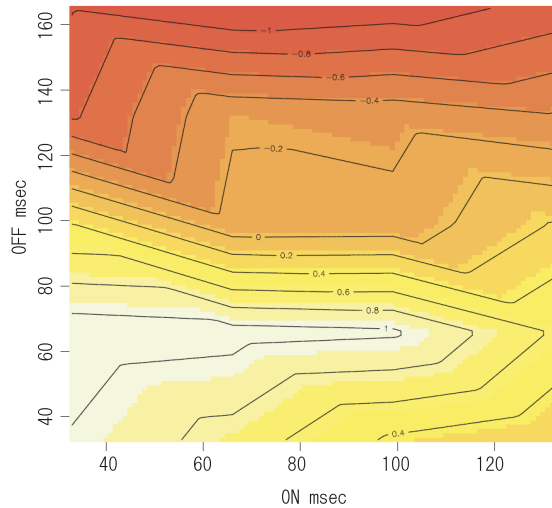


Fig. 5 Visibility map (relationship between ON and OFF time)

の変化が視認性に正の効果をもたらすと解釈できる。すなわち、光強度が急に変化するほど、視認性が高くなることを意味しており、これもまた直観と一致する。

分散分析の結果から、滅灯時間の主効果と、点灯時間と滅灯時間の交互作用、立ち上がり時間と滅灯時間の交互作用が観測された。これらの結果より、図 5、図 6 に示した点灯時間と滅灯時間に関する視認性マップを作成し、その構造を明らかにした。点灯時間や立ち上がり時間に関わらず、滅灯時間が 66 msec 周辺のパターンにおいて、特に視認性が高いことが明らかとなった。本実験では、実験参加者の男女の人数の比率に偏りがあるため、性別による差が含まれている可能性も考えられるが、それを考慮しても、これまでの過去の研究で用いられてきた点滅周波数ではなく、滅灯時間が視認性に対して強く関与しているという新しい知見が明らかになったと考えられる。

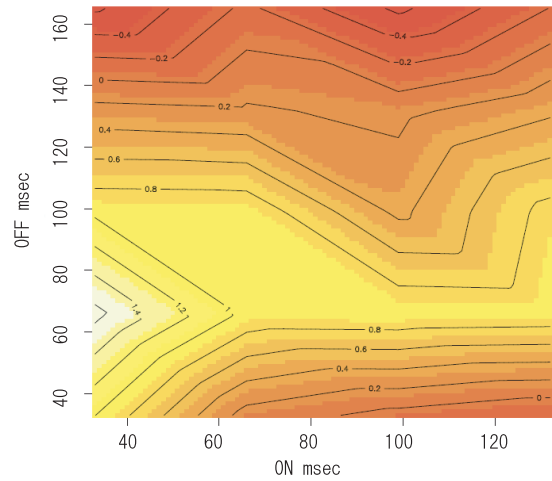
滅灯時間の持続時間が、点灯時間に関わらず視認性に影響を与える理由の一つとして、脳内に存在するオン経路とオフ経路の存在が挙げられる^{23) 24)}。オン経路とは、網膜にあるオン型双極細胞に由来し、光照射により脱分極、すなわちプラスの応答を示す。また、オフ経路とは、オフ型双極細胞に由来し、光照射により過分極、すなわちマイナスの応答を示す。従って、オン経路は、刺激輝度の増加に対する感度が高く、明るさ、より明るいという感覚の生起に関係し、オフ経路は、刺激輝度の減少に対する感度が高く、暗さ、より暗いという感覚の生起に関係すると言える。このように、輝度増加時に賦活する経路と輝度減少時に賦活する経路があることは、代謝の観点からも効率的であるとされ²⁵⁾、さらに、オフ経路の存在は「暗さ」という感覚は「明るさ」が欠如した状態ではなく、それ自体が一つの感覚であるという説もある。

以上より、本研究で得られた 66 msec の滅灯時間が視認性に優位に影響を与えているという結果から、滅灯時間がオフ経路を最も強く刺激し、視認性を向上させていると考えられる。

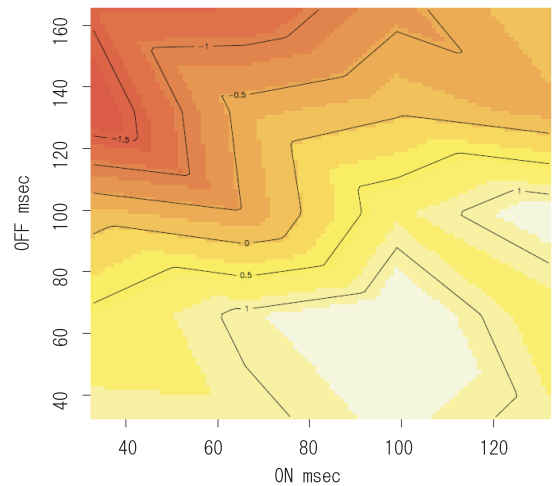
今後は、こうした脳内機序のモデル化も含めて、より効果的な点滅パターンの設計方法について検討を進めていく。

5. 結 言

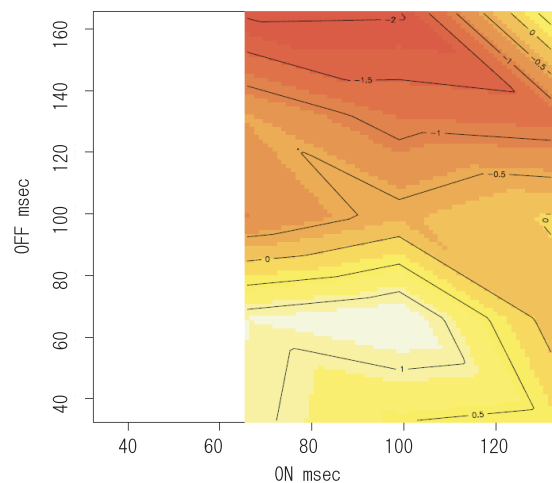
本研究では、緊急車両の安全性向上のため、視認性の高い LED 警光灯点滅パターンの開発を目的とし、点灯時間、滅灯時間、



(a) Visibility map about 0 msec of rising time



(b) Visibility map about 33 msec of rising time



(c) Visibility map about 66 msec of rising time

Fig. 6 Visibility map about 0, 33, and 66 msec of rising time

光強度、立ち上がり時間を組み合わせた点滅パターンに対して、一対比較法により視認性評価実験を行った。得られた結果に対して単回帰分析および分散分析を行ったところ、滅灯時間に関して強い効果があることが明らかになった。点灯時間と滅灯時間に関する視認性マップを作成した結果、滅灯時間 66 msec 付近をピークとした視認性の高い領域が存在することが明らかとなった。すなわち、滅灯時間が視認性に対して強く関与しているという新しい知見が得られたことを示している。

今後、夕方では警光灯の視認性が著しく悪くなるといった報告があるため、環境光の影響を考慮した実環境下において、視認性評価実験を行う必要があると考えられる。また、警光灯は緊急車両だけでなく工場などにも使用されている。近年、このような生産現場では高齢化が進んでいるため、本視認性評価実験においても、加齢による視覚特性の変化の影響を検証する必要がある。特に、若年齢層と老年年齢層における視認性の違いについて、比較・検証を行う必要があると考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、警光灯点滅パターンの設計をはじめ、実験全般にわたりアドバイスをいただきました株式会社パトライトテクノセンター藤井篤氏、石崎隆志氏、菅真人氏、赤松真治氏、吉川貴之氏に厚くお礼申し上げます。

なお、本研究は、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業(平成 22 年～平成 26 年)の助成を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 総務省消防庁: 平成 24 年度救急・救助の現況 (2012).
- 2) 魚住拓司, 並木宏, 小田正志: 昼間用 LED 視線誘導灯の所要光度と設置方法に関する研究, 岩崎電気株式会社 IWASAKI 技法, **13** (2006) 20.
- 3) A. Shiraiwa, E. Aiba, T. Shimotomai, H. Inome, and N. Nagata: An optimal text/background color combination of LED information boards for visibility improvement based on psychological measurements, In S. Tominaga, et al. (Eds.), Computational Color Imaging - CCIW2013. Lecture Notes in Computer Science, **7786** (2013) 119.
- 4) 高松衛, 中嶋芳雄, 飯塚昌之, 吉原紳: 濃霧中における物体色に対する色知覚, 日本色彩学会誌, **23**, 4 (1999) 207.
- 5) 高松衛, 中島賛太郎, 中嶋芳雄, 堀田裕弘: 表面照度による物体色の知覚色評価の差-濃霧中における-, 映像情報メディア学会技術報告, **25**, 79 (2001) 1.
- 6) 内田和宏, 田中敏光, 杉江昇: LED 式屋外型表示装置における夜間視認性の向上: 微弱背景光による輝度コントラストの最適化, 電気学会論文誌 A, 基礎・材料・共通部門誌, **124**, 11 (2004) 954.
- 7) 藤田晃弘, 永田雅典, 池田典弘: 模擬霧環境下での LED 視認性研究, 交通工学研究発表会論文報告集, **21** (2001) 141.
- 8) 永田雅典, 池田典弘, 藤田晃弘: 模擬霧環境下での LED 視認性研究, 人間工学, **38** (2002) 490.
- 9) 中島賛太郎: 霧中における LED 発光体の光覚閾および色覚閾に関する研究, 照明学会誌, **89**, 9 (2005) 641.
- 10) 日本規格協会: JIS 工業用語大辞典 第 5 版, 日本規格協会 (2001).
- 11) 照明学会: 生活環境における視認性評価の概念と課題, 照明学会 (2003).
- 12) 山内俊雄 (班長): 光感受性発作に関する臨床的研究, 平成 9 年厚生科学特別研究 (1998).
- 13) S. Ishida, Y. Yamashita, T. Matsuiishi, M. Ohshima, H. Ohshima, J. Kato, and H. Maeda: Photosensitive seizures provoked while viewing "pocket monsters," a made-for-television animation program in Japan, *Epilepsia*, **39**, 12 (1998) 1340.
- 14) 前川督雄: 視覚情報構造とその生理的効果-ポケモン事件から学んで-, システム制御情報学会, **46**, 12 (2002) 717.
- 15) 遠藤順一, 坂口行成, 佐光興亜: 周期的点滅光刺激に対する脳波と末梢血流の応答, 東海大学紀要 工学部, **41**, 1 (2000) 37.
- 16) 渡辺修久, 岡田健, 三鍋博史, 妹尾和子, 小出典男: 間歇的光刺激における光源輝度の検討-テレビ視聴中に急性症状をきたした患者について-, 医学検査, **50**, 10 (2001) 1349.
- 17) 藤間崇史, 萩原和人, 山本源治, 池田典弘, 永田雅典, 阿山みよし: LED 色彩表示器の目立ち度の評価, 照明学会全国大会講演論文集 **38**, (2005) 207.
- 18) 飛谷謙介, 土屋晋, 藤澤隆史, 饗庭絵里子, 長田典子: LED 警光灯の視認性向上のための感性指標に基づく点滅パターン評価方法, 電気学会論文誌 D, **133**, 2 (2013) 240.
- 19) E. Mariotte: A new discovery touching vision, *Philosophical Transactions* (1665) 668.
- 20) B. R. Frieden: Science from Fisher Information: A Unification, Cambridge University Press (2004).
- 21) R. A. Bradley, and M. E. Terry: The rank analysis of incomplete block designs: The method of paired comparisons, *Biometrika*, **39**, (1952) 324.
- 22) R Development Core Team: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria (2006).
- 23) 日本視覚学会: 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店 (2000) 54.
- 24) L. T. Sharpe and A. Stockman: Rod pathways: the importance of seeing nothing, *Trends in Neurosciences*, **22**, 11 (1999) 497.
- 25) 滝浦孝之: オン経路とオフ経路-明暗情報の処理-, 人間環境学研究, **4**, 2, (2005) 37.