

LED 付き安全チョッキの視認性に関する検証

佐々木 航^{*}，赤野 史典^{**}，清水 鉄也^{**}

概 要

当庁では、暗所における消防活動の際、反射材付きの安全チョッキを着用している。近年、LED 付き安全チョッキが市販されていることから、LED 付き安全チョッキの発光色等の違いによる視認性を比較し、当庁の装備として最適な LED 付き安全チョッキを明らかにすることを目的とした。方法は、消防活動現場を再現した環境（背景光あり・なし、煙）で発光色（赤、白、青、緑）による視認性の差異を一対比較法により評価した。さらに、発光パターン（点滅、点灯、消灯）、発光数（11 個、6 個、3 個）による差異を評価した。

検証の結果、いずれの環境においても、緑色 LED 光が最も視認性が高かった。発光パターンは点滅が、発光数は数が多いほど視認性が高いことが明らかになった。緑色 LED 光が点滅する安全チョッキは、消防活動現場において視認性が高く、当庁の装備として最適である。

1 目的

当庁では、夜間やトンネル等の暗所における消防活動現場において、付近を通行する車両等から活動中の消防隊員の二次的災害の発生を防ぐため、防火衣を着用しない場合には、反射材付きの安全チョッキを活動隊員に着用させている。車両等の前照灯から照射される光が安全チョッキの反射材で反射することにより運転手から活動隊員を容易に認識でき、二次的災害防止に繋がるものと期待されている。しかしながら、反射材を活用した安全チョッキは、前照灯などの強い光に照らされなければ、視認性の向上に繋がらない点が課題であった。

昨今、発光ダイオード（以下「LED」という。）の普及に伴い、様々な発光色、発光パターン、発光数の LED 付き安全チョッキ（写真 1）が市販品として登場し、道路工事現場の誘導員等に広く活用されている。

当庁でも、活動中の消防隊員の更なる安全確保を目的に、LED 付き安全チョッキの導入が検討されている。消防活動現場は、消防車両の赤色灯や前照灯などの赤色や白色の光が多く混在する特殊な環境であると言えるが、このような環境において視認性の高い LED の発光色等に関する知見はない。

そこで、本検証では、消防活動現場と同等の環境を再現し、LED の発光色等による視認性の違いを比較検証し、夜間の消防活動に最適な LED 付き安全チョッキの仕様を明らかにすることを目的とした。

2 方法

(1) 概要

消防活動現場で想定される視認性の低下する環境を再現し、LED 付き安全チョッキの、LED の発光色、発光パターン、発光数の違いによる視認性の差異を、被験者の目視による官能評価により比較した。

(2) 日時

令和 2 年 1 月 8 日から令和 2 年 2 月 3 日までの日没後

(3) 場所

東京消防庁消防学校 C 敷地

(4) 比較項目

比較項目を表に示す。



写真 1 LED 付き安全チョッキ

表 比較項目

比較項目	環境条件
ア 発光色 【赤色、白色、青色、緑色】	a 背景光あり
	b 背景光なし
	c 煙（仮想）
イ 発光パターン 【点灯、点滅、消灯】	d 前照灯照射
ウ 発光数 【11個、6個、3個】	e 背景光なし

ア 発光色

LED の発光色が赤色、白色、青色及び緑色である LED 付き安全チョッキ（日本緑十字製、タスキ型 LED 反射ベスト）を使用し、発光色（4色）の違いによる視認性の差異を比較した。4色の中から2色ずつの相対比較を、全ての色の組み合わせで実施した（計6種類の組み合わせ）。なお、測定は視認性の低下する環境として、背景光なし、背景光あり、煙（仮想）の環境でそれぞれ実施し、LED の発光パターンは点滅状態で実施した。

イ 発光パターン

LED の発光パターンを点灯（常時点いている状態）、点滅（断続的に点いている状態）、消灯（LED の発光は無く、反射材付き安全チョッキと同等の状態）とし、これらの発光パターンの違いによる視認性の差異を比較した。3パターンの中から2パターンの相対比較を、全ての組み合わせで実施した（計3種類の組み合わせ）。なお、測定は消灯状態（反射材のみ）でも視認できるよう前照灯を照射した環境で実施し、LED の発光色は、前アの背景光ありの環境で視認性が最も高い色とした。

ウ 発光数

安全チョッキで点灯させる LED の発光数を 11 個、6 個、3 個としたときの視認性の差異を比較した。発光数の調整は、安全チョッキの LED 部分をテープで覆い、LED の光が漏れないように遮光した（写真 2）。なお、背景光なしの環境で実施し、LED の発光色は、前アの背景光なしの環境で視認性が最も高い色とし、発光パターンは前イで最も視認性が高い発光パターンとした。

(5) 被験者

東京消防庁消防技術安全所に勤務する職員とし、表中 a 及び b 条件の被験者数は 40 名、その他の条件の被験者数はそれぞれ 7 名とした。被験者の年齢（平均±標準偏差）は、被験者 40 名については 39±9 歳、被験者 7 名については、39±5 歳であった。

(6) 検証の実施方法

被験者から 60m 離れた位置に消防隊員を模した 2 体のマネキンを、被験者に対面するように設置した。被験者とマネキンの距離（60m）は、時速 80 km（首都高速



写真 2 発光数を調整した安全チョッキ（6個）

道路の最高速度）で走行する乗用車が停止できる距離¹⁾とした。

マネキンに対して比較する LED 付き安全チョッキを着用させた。LED 付き安全チョッキに使用する単 3 形電池は、検証の都度新品を使用した。

背景光なしの環境（マネキンの後方 1 m の位置に消防車両を停車させ、消防車両の赤色灯と前照灯は消灯、写真 3）、背景光ありの環境（背景光なしの環境と同じ位置に消防車両を停車させ、消防車両の赤色灯と前照灯を点灯）、前照灯照射の環境（被験者横に消防車両を停車し、車両の前照灯でマネキンを照射した状態）は、図 1 から図 3 のように設定した。

煙（仮想）の環境は、被験者に光の透過を減衰させるサングラス（減光係数 2.0 m^{-1} に調整）を着用させて、火災による煙の中にいる状態と同等の視界を再現し、その状況で被験者に LED 光の視認性について評価させた。

測定は、評価開始前に被験者に LED 付き安全チョッキに背を向けた状態で待機させ、マネキンに LED 付き安全チョッキを着用させた後に被験者を振り向かせ、視認性を評価させた（写真 4）。評価後は再度 LED 付き安全チョッキに背を向けさせた。



写真 3 検証の設定状況

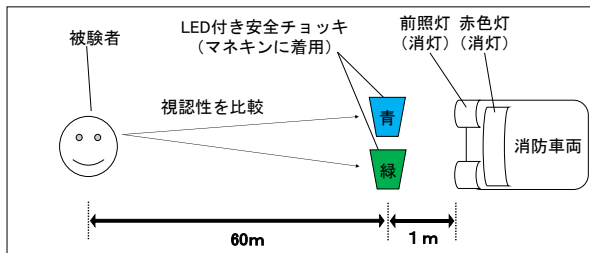


図1 背景光なしの環境

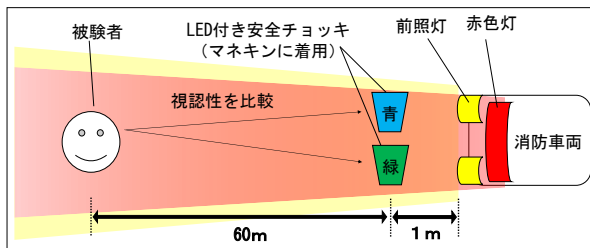


図2 背景光ありの環境

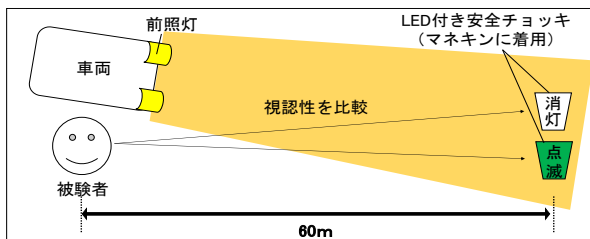


図3 前照灯照射の環境



写真4 評価中の被験者

発光色の比較では、同じ組み合わせの評価を背景光なしの環境、背景光ありの環境で連続して実施した。なお、順序による評価の偏りを相殺するため、発光色の比較では、被験者を6つのグループに分け、グループごとに実施する色の組み合わせの順序をランダム化した。

(7) 評価方法

被験者に対し比較するLED付き安全チョッキの組み合わせについて、「どちらが目立つか」を7段階で評価させた。評価用紙の記入例は、図4のとおり。例えば、赤

色と白色のLED付き安全チョッキを比較した際に、赤色が白色より「少し目立つ」ようであれば、-1（少し目立つ）にチェックさせた。

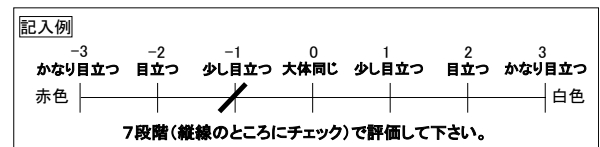


図4 評価用紙の記入例（例：発光色の比較）

(8) 統計分析

統計分析は、Scheffe の一対比較法（中屋の変法²⁾）を用いた。統計ソフトは、R（version 3.5.1）を使用し、有意確率5%未満（ $p < 0.05$ ）を有意差ありとした。

(9) 倫理的配慮

全ての被験者に対して検証の目的、方法を説明するとともに、検証への参加の同意を書面にて得た。なお、本検証は東京消防庁技術改良検証倫理審査専門部会の承認のもと、安全面に十分に配慮し実施した。

3 結果

平均評価値を小数点第2位（小数点第3位を四捨五入）まで算出し、直線状のグラフにプロットした。

(1) LEDの発光色

ア 背景光なし（図5）

背景光なしの環境において、LEDの発光色別に平均評価値を比較すると、発光色の違いによる主効果に有意差（ $p < 0.01$ ）が認められた。視認性が高い順に、緑色（平均評価値 0.85）、白色（平均評価値 0.24）、赤色（平均評価値 -0.25）、青色（平均評価値 -0.84）となり、個々の発光色を比較すると、4色の全ての組み合わせで有意差（ $p < 0.01$ ）が認められた。

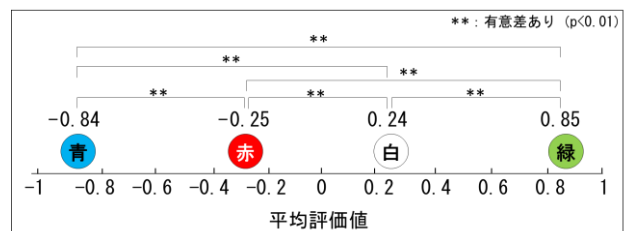


図5 発光色の比較（背景光なし）

イ 背景光あり（図6）

背景光ありの環境において、LEDの発光色別に平均評価値を比較すると、発光色の違いによる主効果に有意差（ $p < 0.01$ ）が認められた。視認性が高い順に、緑色（平均評価値 0.96）、白色（平均評価値 -0.04）、赤色（平均評価値 -0.13）、青色（平均評価値 -0.78）となり、個々の発光色を比較すると、白と赤以外の全ての組み合わせで有意差（ $p < 0.01$ ）が認められた。

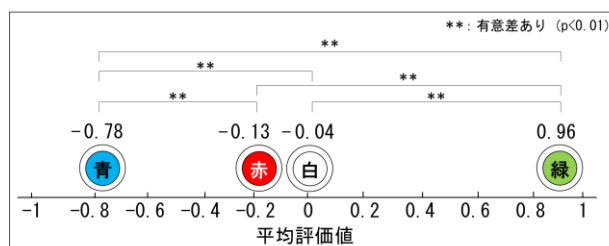


図6 発光色の比較（背景光あり）

ウ 煙（図7）

煙（仮想）の環境において、LEDの発光色別に平均評価値を比較すると、発光色の違いによる主効果に有意差（ $p < 0.01$ ）が認められた。視認性が高い順に、緑色（平均評価値 1.11）、白色（平均評価値 0.43）、赤色（平均評価値 -0.21）、青色（平均評価値 -1.32）となり、個々の発光色を比較すると、4色の全ての組み合わせで有意差（ $p < 0.01$ ）が認められた。

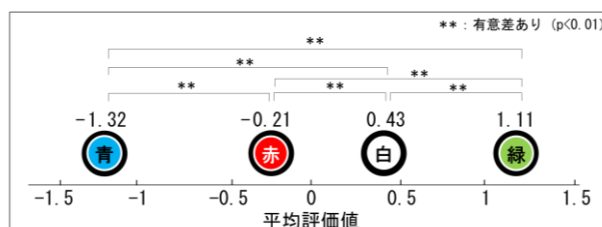


図7 発光色の比較（煙想定）

(2) LEDの発光パターン（図8）

LEDの発光色は緑色で測定を行った。発光パターン別に平均評価値を比較すると、発光パターンの違いによる主効果に有意差（ $p < 0.01$ ）が認められた。視認性が高い順に、点滅（平均評価値 1.19）、点灯（平均評価値 0.38）、消灯（平均評価値 -1.57）となり、個々を比較すると、3パターンの全ての組み合わせで有意差（ $p < 0.01$ ）が認められた。

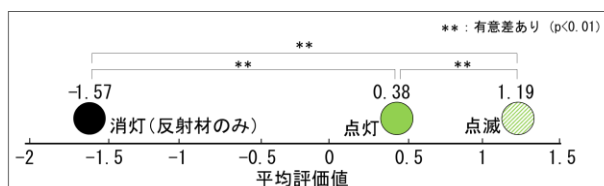


図8 発光パターンの比較

(3) LEDの発光数（図9）

LEDの発光色は緑色、発光パターンは点滅で測定を行った。LEDの発光数別に平均評価値を比較すると、発光数の違いによる主効果に有意差（ $p < 0.01$ ）が認められた。視認性が高い順に、11個（平均評価値 0.95）、6個（平均評価値 0.10）、3個（平均評価値 -1.05）となった。個々を比較すると、全ての組み合わせで有意差が認めら

れ、有意確率は3個と6個、3個と11個の比較においては1%未満、6個と11個の比較においては5%未満であった。

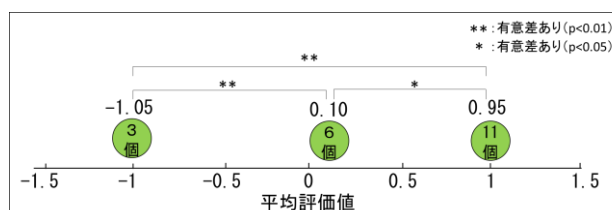


図9 発光数の比較

4 考察

(1) 発光色の比較

車の前照灯や太陽のように、極端に明るい光源はグレア源と呼ばれる。視野内にグレア源が存在すると一時的な視力低下の原因となり、対象物の視認性が低下する³⁾。夜間やトンネル等の暗所における消防活動現場では、消防車両の存在を目立たせ、また緊急活動中であることを周囲に知らせるために赤色灯や前照灯が活用されているが、これらがグレア源になりうる。このため、消防活動現場を通過する車両等の運転手は、これらのグレア源の存在により消防車両付近で活動する消防隊員の認識が困難となり、結果として消防隊員の二次的災害に繋がる危険性がある。そこで、消防活動現場に多く見られる赤色灯や前照灯のグレア源が存在する環境を再現し、LEDの発光色や発光パターン等の違いによる視認性の差異を比較した。

検証の結果、LEDの発光色の違いによる視認性の差異を比較すると、背景光なしの環境、背景光ありの環境、煙（仮想）の環境の何れにおいても、緑色LED光の評価が最も高かった。つまり、消防活動現場において、安全チョッキの視認性を高めるには緑色LED光を採用するのが適当であることが明らかとなった。

緑色LED光の視認性が高い理由として、比視感度及び背景光との干渉の2つが考えられる。比視感度とは、人間が最も明るく感じる色の光の明るさ感を1とし、これと同じエネルギーを持つ光の明るさ感を相対値で表したものである。人間が感じる色の光の明るさは、同じエネルギーであれば緑色の光を明るく感じ、赤色や青色の光は相対的に暗く感じる事が分かっている⁴⁾。本検証においては赤色、白色、青色、緑色のLED光を比較対象としており、この中では緑色の比視感度が最も大きいことから、本検証でも緑色LED光の視認性が最も高くなったと考えられる。

また、白色LED光の視認性が緑色LED光に次いで高くなった理由として、白色の光は視認性の高い緑色に近い波長成分を含んでいる⁵⁾ためと考えられる。白色LED光は、複数の波長（色）の光で構成されており、単一の波長である赤色や青色より比視感度が高い（明るく感じ

る) 色の光を含んでいるために、赤色や青色の LED 光より視認性が高いという結果になったと考えられる。

緑色 LED 光の視認性が高くなった別の理由として、背景光との干渉が考えられる。本検証では、LED 付き安全チョッキの後方に背景光としてグレア源となる赤色灯と前照灯を点灯させた。このため、背景光と同色である赤色 LED 光や白色 LED 光は背景光に紛れて同化し、識別が困難となったと考えられる。一方、緑色 LED 光は、背景光の赤色や白色と異なる発光色であることから、背景光に紛れることなく認識されたと考えられる。また、赤色 LED 光と白色 LED 光を比較したところでは、背景光なしの環境においてはこの 2 色の間に有意差が認められたが、背景光ありの環境においては有意差が認められなかった。このことから、赤色灯や前照灯等、多くのグレア源が存在する消防活動現場ならではの特殊な環境においては、識別が困難な赤色 LED 光や白色 LED 光は安全チョッキへの適性が低いことが明らかとなった。

青色 LED 光は背景光の赤色や白色とは異なる色であることから、認識しやすいものと考えられたが、視認性が低いという結果になった。理由として、青色 LED 光は比視感度が低い(暗く感じやすい)色であることから、背景光に埋もれてしまったためと考えられる。検証を実施した被験者からは、「青色 LED 光は他と比べて弱く感じる」という意見が多く挙げられた。このことから、青色 LED 光は安全チョッキに適さないことが明らかとなった。

また、本検証では消防活動現場における特殊性を考慮し、火災で発生した煙により光が減衰する状況における LED 光の視認性への影響についても評価を行った。実際に煙を発生させて、その中で被験者に対して LED 光の視認性を評価させるのが理想的ではあるが、多数の被験者に対して繰り返し検証を実施する中で、一定の状態の煙を繰り返し再現することが困難なため、本検証では被験者に光の透過を減衰させるサングラス(減光係数 2.0 m^{-1})を着用させて煙の中にいる状態と同等の視界を再現し、LED 光の視認性について評価させた。

その結果、他の条件と同様に緑色 LED 光の視認性が最も高いことが明らかとなった。消防活動現場特有の赤色灯や前照灯のグレア源が存在する環境のみならず、周囲に煙が漂い、光が減衰する火災現場のような環境においても、緑色 LED 光の視認性の優位性が確認できたことから、安全チョッキに緑色 LED を採用することにより、消防活動の様々な状況において視認性の向上に寄与することが期待できる。

(2) 発光パターン

本検証では、LED の発光パターンの違いによる視認性の差異を評価するため点灯、点滅、消灯(現行型の安全チョッキと同様に、LED の発光はなく反射材のみの状態)の 3 つの条件で比較した。

本検証の結果、LED の発光パターンの違いによる視認性の差異を比較すると、点滅の視認性が最も高く、次い

で点灯、消灯の順であった。また、これらは個々の比較においても有意差が認められた。つまり、LED 付き安全チョッキは発光パターンに関わらず反射材のみの現行の安全チョッキより視認性が高く、また LED の発光パターンは点灯よりも点滅の視認性が高いことが明らかになった。

LED 付き安全チョッキが反射材のみの安全チョッキより視認性が高い理由として、LED は自ら発光することにより周囲から識別し易い一方で、反射材は照射された光を反射する際に光の強さが減衰することから、自ら発光する LED の光と比べて光の強さが劣るためと考えられる。

点滅が点灯より視認性が高い理由として、被験者の視野に映る前照灯や街灯などの多くの光が点灯状態であるのに対して、断続的に点灯と消灯を繰り返す点滅は視界の中で動きがあるように捉えられ、注意が向きやすく、周囲から識別し易いからであると考えられる。猪目らが行った LED の警光灯の点滅パターンの視認性評価によると、点滅は点灯より著しく視認性が高い⁶⁾。本検証は、この先行研究で得られた知見を支持する結果となり、点滅は点灯より視認性が高いことが再確認できた。

さらに、消費電力の観点から、点滅は点灯より電力の消費が少ないというメリットがある。LED は点灯している間のみ電力を消費するため、断続的に点灯と消灯を繰り返す点滅は、消灯している時間が存在している分、点灯と比較して消費電力の抑制に繋がり、より長時間の発光が可能となる。

したがって、視認性と発光可能時間(消費電力)を考慮すると、LED 付き安全チョッキは、LED を点滅状態とすることにより視認性を高められ、また消費電力の抑制に繋がり長時間の使用が可能であるというメリットがある。

(3) 発光数

本検証の結果、LED の発光数の違いによる視認性の差異を比較すると、視認性が最も高いのが 11 個で、次いで 6 個、最も低いのが 3 個であった。また、これらは個々の比較においても有意差が認められた。つまり、安全チョッキに使用する LED は、発光数が多いほど視認性が高いことが明らかとなった。その理由として、当然のことながら、LED の発光数が多いほど光量(光束)が増加し、被験者には明るく感じられるため、と考えられる。

一方で、発光数の増加と視認性の向上の関係は正比例にならず、LED の発光数が多いほど、LED 1 個あたりの視認性に寄与する効果は小さくなった。図 9 において、発光数 3 個と発光数 6 個の平均評価値の差は 1.15、発光数 6 個と発光数 11 個の平均評価値の差は 0.85 であった。それぞれの組み合わせについて、LED の個数差 1 個あたりの平均評価値の差を算出すると、それぞれ 0.38 ($1.15 \div 3$ 個)と 0.16 ($0.85 \div 5$ 個)となり、LED の発光数が多くなるほど、LED 1 個あたりの明るさに与える効果(平均評価値)は小さくなった。

また LED の発光数の増加は、製作コストの増加、重量の増加、消費電力の増加などデメリットにも繋がることから、LED 付き安全チョッキの仕様を決める際には最適な LED の個数について総合的に検討する必要があると思われる。

5 まとめ

(1) LED の発光色について

周囲に光がない環境、消防活動現場を想定した（赤色灯や前照灯が点灯している）環境、火災現場を想定した（煙で視界が悪くなる）環境において、緑色 LED 光が最も視認性が高い。

(2) LED の発光パターン、発光数について

発光パターンについて、点滅が、点灯及び消灯状態（反射材のみの現行の安全チョッキ）より、視認性が高い。また、発光数が多いほど視認性が高い。

6 おわりに

緑色 LED 光が点滅する安全チョッキは、消防活動現場において視認性が高く、当庁の装備として最適である。

7 謝辞

本検証を実施するにあたり、救急救命東京研修所の田邊晴山教授から貴重な助言を頂きました。また、本検証の被験者として、装備課、消防技術課、装備安全課、危険物質検証課の皆様にご協力頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) World Health Organization ほか：Speed management - A roadsafety manual for decision- makers and practitioners- p. 7、2008
- 2) 高木英行：使える！統計検定・機械学習Ⅲ—主観評価実験のための有意差検定、システム/制御/情報、Vol. 58、No. 12、pp. 514-520、2014
- 3) 木村文香ほか：運転支援を目的とした車載カメラ画像からの交通信号機の視認性自動認識、情報科学技術フォーラム一般講演論文集、Vol. 6、No. 4、pp. 201-202、2007
- 4) 京藤伸弘：照明基礎講座 光とは、建設電気技術技術集、Vol. 175、No. 9、pp. 30-31、2011
- 5) 別所誠ほか：LED 照明の動向と展開、東芝レビュー、Vol. 65、No. 7、2010
- 6) 猪目博也ほか：LED 警光灯の視認性向上- 目立ちやすさの感性指標に基づく点滅パターン評価法-、社団法人映像情報メディア学会技術報告、Vol. 34、No. 10、pp. 89-92、2010