

LED のパルス光照射における劣加法性 Subadditive effect of pulsed LED lighting

キーワード: LED, 劣加法性, パルス光, ipRGC

人間生活工学研究室: 石橋 彰吾

■ Abstract

It has been proved that polychromatic has subadditivity by experiments at night. However, there is no experiment to investigate the effect of the degree of daytime alertness. In this study, monochromatic (λ_{max} 470 and 529 nm administered singly and combination) light and two white light stimuli were photon matched for their predicted ability to stimulate melanopsin, and their capacity to affect physiological response and subjective alertness and mood was assessed. As a result, it was found that combination pulsed light suppressed pupillary miosis and AAC than blue light although combination light has twice the irradiance. And found difference of miosis in the white lights are due to spectral distribution. This study demonstrates for the first time that combination pulsed light indicates subadditivity during the day.

■ 背景

ヒトにおける光への非視覚的応答は短波長光(青)に敏感で、これは感光性網膜神経節細胞(ipRGC)で発現しメラノプシン色素に起因している¹⁾。複数の単波長光曝露の比較実験によると、日中の青色単波長光曝露は縮瞳作用と覚醒作用を誘発する²⁾。また、発光時間が非常に短い青色LEDパルス光をヒトに曝露し、ipRGCの応答特性に起因した非視覚的作用の誘発も確認された³⁾。一方で、青色光による光刺激呈示時に同じ眼球に対して同時に緑色光を呈示することで光の劣加法性、すなわち ipRGC 機能の抑制を引き起こし覚醒作用の減少が確認されている⁴⁾。更に、メラノプシン刺激量を統一させた単色光と多色光(白色)の比較研究では単色光で有意に覚醒度の抑制が確認されている⁵⁾。しかし、先行研究では夜間実験がほとんどであり、日中の劣加法性を評価したものは見られない。

■ 目的

本研究ではこれらの知見から日中の短時間のLED照明パルス照射においても単色光の混色や白色光による劣加法性が起こると仮定し、生理反応と主観的な覚醒度評価によりその効果を検証することを目的とした。

■ 実験 I 方法

被験者

覚醒正常で健康な男子大学生 11 名 (平均 23.1 ± 0.9 歳)

方法

室温 26 °C、相対湿度 50%に設定した暗室ブース内にて実験を行った。光源として積分球を用い、光刺激用 LED をその内側に設置した。瞳孔径測定装置(EMR-8B, ナックイメーজテクノロジー)と乳白色の拡散板を設置した机の前に裸眼の被験者を着座させた(図1)。

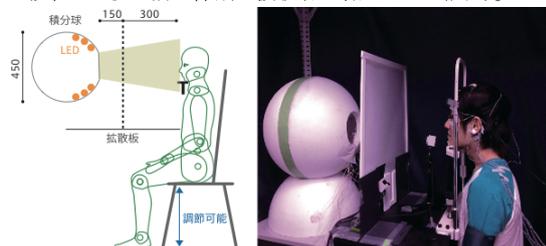


図1 実験装置と実験風景

光条件

単色光条件はメラノプシンの最大感度と錐体の感度から選出し、パルス照射による単色LED光の λ_{max} はそれぞれ 470、529 nm とした(図2A)。既往報告でパルス光による非視覚的效果が確認された放射照度³⁾の単色光を中条件とした。白色光条件は短波長域にピークを持つLED(CREE MX-6:C 条件)とブロードなスペクトルを持つLED(試作品:S条件)の同一色温度(5000 K)である2種を使用し(図2B)、青中条件とメラノプシン最大感度¹⁾における刺激量を統一させる為に Lamb(1995)⁶⁾の分光吸収特性を使用した(表1)。刺激光の発光時間は 1 ms であった。

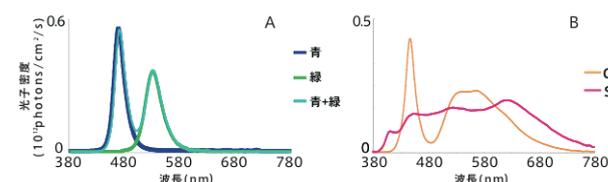


図2A 単波長光条件のスペクトル

図2B 白色光条件のスペクトル

表1 光条件

Light condition	Irradiance ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	Photon density ($\text{photon}/\text{cm}^2/\text{s}$)	"Melanopsin-stimulating" photon density ($\text{photon}/\text{cm}^2/\text{s}$)
青弱	10.2	2.4×10^{13}	2.2×10^{13}
緑弱	10.0	2.7×10^{13}	1.1×10^{13}
青 + 緑弱	20.2	5.6×10^{13}	3.3×10^{13}
青中	15.4	3.7×10^{13}	3.3×10^{13}
緑中	14.9	4.0×10^{13}	1.7×10^{13}
青 + 緑中	30.3	7.7×10^{13}	5.0×10^{13}
青強	19.8	4.7×10^{13}	4.2×10^{13}
緑強	19.9	5.3×10^{13}	2.3×10^{13}
青 + 緑強	39.7	1.0×10^{14}	6.5×10^{13}
C	40.7	1.1×10^{14}	3.3×10^{13}
S	47.2	1.0×10^{14}	3.3×10^{13}

実験手順・測定項目

被験者は 45 分の暗順応の後、カウンターバランスをとった各光条件を暴露された。1 条件での刺激提示は 3 分間で 3 回行い、10 分の休憩を挟んだ後に次の光が暴露された。

瞳孔径測定装置により瞳孔径(左眼)を測定し、瞳孔径の一過性応答における時間経過や径変化量を指標とした。覚醒水準の指標を KSS(Kwansei-gakuin Sleepiness Scale)、眠気スコアを VAS 法により刺激提示の前後で測定した。

データ処理・統計解析

瞳孔径は 3 回の提示の平均値を使用した。光暴露直後の最大縮瞳と、刺激後から瞳孔径が 85 %まで回復した時間を算出した。KSS と眠気スコアは刺激提示前後の変化量を算出した。

条件を、単色(混色)光の強度"弱"、"中"、"強"と"白色"に分類しそれぞれのクラスタについて一元配置反復測定分散分析と Bonferroni の多重比較検定を行った。

■ 実験 I 結果と考察

各条件における最大縮瞳率を図3に示す。単色光における全ての強度で、青色光は緑色光より有意に大きな縮瞳が起こり、これは先行研究と一致している²⁾。また、各条件における 85%までの縮瞳回復時間を図4に示す。

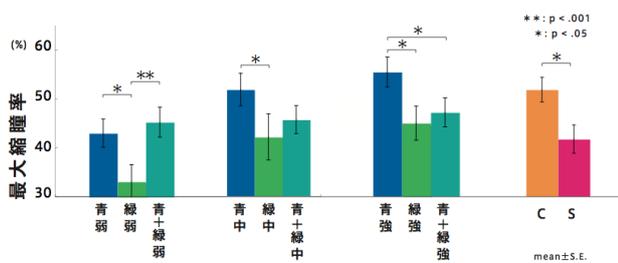


図3 各条件における最大縮瞳率

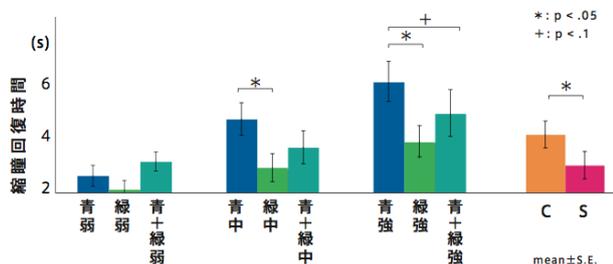


図4 各条件における縮瞳回復時間

“強”条件において、青色光で青+緑光より有意に大きな縮瞳が起こった。また、縮瞳回復時間の遅れが生じる傾向がみられた。先行研究で示された劣加法性⁴⁾が、本実験の様な日中の短時間照射でも十分な放射照度(39.7 μW/cm²)の時に生じることを示唆している。“白色”条件では、C条件がS条件より有意に大きな縮瞳を起こし、縮瞳回復時間に有意な遅れを起こした。更に眠気スコアの変化量において、C条件がS条件に対して眠気が減少する傾向がみられた。本実験の各光刺激における視細胞と ipRGC への刺激量と最大縮瞳率について重回帰分析を行ったところ ipRGC は縮瞳に正の関係性つまり縮瞳を起こす働きを、L 錐体は負の関係性つまり縮瞳を抑制する結果となった。Revellらは白色光において551-600 nmの光子束が多いことでM、L錐体を経由、もしくはメラノプシンの光再活性化機能を経由したことで減弱効果を強化できると示唆しており⁵⁾、上記の結果を支持している。

■実験Ⅱ 方法

被験者

色覚正常で健康な男子大学生11名(平均22.9 ± 0.9歳)

方法

実験Ⅰと同様

光条件

実験Ⅰで劣加法性がみられた結果より、“強”条件で用いた3種の光源を使用した。

実験手順・測定項目

被験者は電極設置後に45分の暗順応を行い、カウンターバランスをとった各パルス光条件を15分間(1ms, 100Hz)暴露された。その後45分の安静を行い、次の刺激が提示された。

実験Ⅰの指標に加え、生理指標では脳波(Fz、Cz、Pz、O1、O2部位)のα波帯域率およびα波減衰係数(AAC)、心電図、血圧を測定し、VAS法による主観評価では落ち着き、リラックス、目の疲れスコアを測定した。各項目を暴露前、暴露中、暴露後の各時間で測定した。

データ処理・統計解析

瞳孔径は刺激提示後の最大縮瞳率と各時間における暴露前からの変化率を解析に用いた。脳波、心電図(心拍変動性)、血圧(収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧)は各時間における暴露前からの変化率を、主観評価は各時間における暴露前からの変化量をそれぞれ解析に用いた。

各計測時間において、光条件を要因とした一元配置反復測定分散分析とBonferroniの多重比較検定を行った。

■実験Ⅱ 結果と考察

瞳孔径

実験Ⅰ同様に、照射開始後の最大縮瞳率において青>青+緑となり劣加法性を示した。条件間の縮瞳率の差は5%程度でこれは実験Ⅰの“強”条件とほぼ同様の結果であり、劣加法性の再現性を確認できる結果であったと言える。

脳波(α波帯域率、α波減衰係数)

照射終了直後のO1、O2部位のα波帯域率の変化率は青+緑>緑であり、放射照度が2倍にも関わらず青+緑でα波帯域率が増加、すなわち覚醒度が減衰する結果となった(図5A)。また、照射中のFz、Cz部位においてα波減衰係数は青>青+緑であり、青+緑で覚醒度が低減することが示された。これらの結果から脳波においても劣加法性が示された(図5B)。

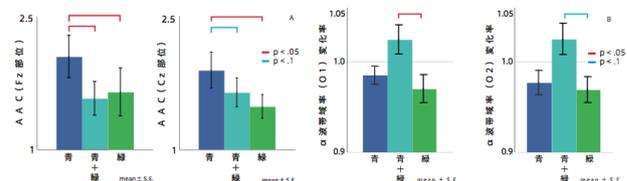


図5A Fz、Cz部位のAAC

図5B 照射終了後のO1、O2部位のα波帯域率変化率

眠気スコア

パルス光照射後のVAS法による眠気スコアにおいて緑>青、青+緑であった。主観的覚醒度が青色光照射により有意に増加する点は先行研究と一致しており⁷⁾、青+緑においても眠気が抑制された点に関しては光の強度による効果であると考えられる。

心電図、血圧、KSS、主観評価(落ち着き、リラックス、目の疲れ)

各時間において光条件の主効果は無かった。

■まとめ

日中の覚醒度に青色、緑色および白色LEDの単独、混合パルス照射が与える影響を二つの実験で生理指標を測定することにより定量的に評価した。瞳孔径、脳波α波減衰係数において、青色と緑色LEDの混合照射により青色光の作用が減弱した。白色光のパルス光照射においてもスペクトルの違いにより瞳孔径において劣加法性を示した。本研究は日中のパルス光照射による劣加法性を確認した初めての研究である。

■参考文献

- 1) Berson et al., Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock, *Science*, 295, 1070-1073(2002)
- 2) 李ら: 単波長の光曝露に対する生理反応, *日本生理人類学会誌*, 13(2), 75-83(2008)
- 3) Katsura et al., Effects of blue pulsed light on human physiological functions and subjective evaluation, *Journal of Physiological Anthropology*, 31, 23(2012)
- 4) Figueiro et al.: Retinal mechanisms determine the subadditive response to polychromatic light by the human circadian system, *Neuroscience Letters*, 438, 242-245(2008)
- 5) Revell et al., Predicting human nocturnal nonvisual responses to monochromatic and polychromatic light with a melanopsin photosensitivity function, *Chronobiology International*, 27, 1762-1777(2010)
- 6) Lamb, Photoreceptor spectral sensitivities: common shape in the long-wavelength region, *Vision Research*, 35, 3083-3091(1995)
- 7) Lockley et al., Short-wavelength sensitivity for the direct effects of light on alertness, vigilance, and the waking electroencephalogram in humans, *Sleep*, 29, 161-168(2006)