

パルス光照射時の視覚的作用及び非視覚的作用における光の劣加法性

Subadditive responses to pulsed light on visual and nonvisual effect

キーワード: パルス光、非視覚的作用、劣加法性、ipRGC

人間生活工学研究室 13TM1105 内山 友里亜

■Abstract: It has been proved that simultaneous exposure to blue and green light resulted in less nonvisual effect such as pupillary constriction and melatonin suppression than blue or green monochromatic light. In this study, experiments were carried out using blue and green pulsed lights to assess the subadditive responses on both visual and nonvisual effect. As a result, it was found that simultaneous blue and green pulsed light exposure reduced pupillary constriction and positive component of electroretinogram (ERG) than blue light. The effect of the subadditive responses was showed in only nonvisual effect and it wasn't showed in visual effect. It was suggested that the subadditive responses were caused via pathway in the retina.

■背景

内因性感受性網膜神経節細胞(ipRGC)は、青色光に対して特異的な感度を有しており、覚醒水準や生体リズム、メラトニン分泌の調整や、瞳孔の対光反射などの、非視覚的作用を誘発する¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。先行研究において、照射時間がmsオーダーのパルス光に対しても、非視覚的作用の誘発が示されている⁵⁾。また、青色光と緑色光を同時に照射した混合光において、青色光を単独で照射した時よりも非視覚的作用が減弱すること、すなわち、光の劣加法性が確認されている⁶⁾⁷⁾。しかし、劣加法性に対して視覚的作用や光受容器の応答を含めた評価は行われていない。

■目的

本研究では、パルス光を用いて、視覚的作用と非視覚的作用の双方から光の劣加法性を評価することを目的とした。

■方法

被験者

色覚正常で健康な男性12名(平均24±1.3歳)が被験者として実験に参加した。

実験環境

室温25℃、相対湿度50%に設定した暗室ブースにおいて実験を行った。照明装置には、発光ダイオード(LED)を内部に設置した積分球を用い、開口部の正面に被験者を着座させ、測定を行った(図1)。

光条件

背景光には白熱電球(相関色温度2287K、輝度30cd/m²)、刺激光には青色LED(ピーク波長464nm、光量子密度1.6×10¹⁵photons/cm²/s)及び緑色LED(ピーク波長526nm、光量子密度1.6×10¹⁵photons/cm²/s)を光源として用い(図2)、3つの光条件(青色光単独、青色光と緑色光の混合光、緑色光単独)を比較した(表1)。背景光は常時点灯し、刺激光のパルス幅は2.5msであった。



図1 実験環境

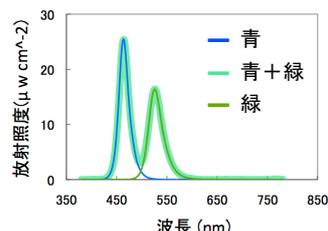


図2 分光分布

表1 光条件

光条件	光量子密度 (photons/cm ² /s)	ピーク波長 (nm)
青	1.6×10 ¹⁵	464
青+緑	3.2×10 ¹⁵	-
緑	1.6×10 ¹⁵	526

実験手順

10分間の明順応の後、瞳孔径の測定を行った。続いて10分間の休憩を含み、網膜電図、脳波(視覚誘発電位)の測定及び主観評価を行った(図3)。実験条件の実施順序はカウンターバランスをとった。

指標及び解析

瞳孔径(左眼)の測定には、アイマーカーコーダ(EMR-8B、ナックイメージテクノロジー)を使用した。1条件につきパルス光を3回照射した時の瞳孔径の反応を記録し、パルス光照射前の平均値に対する最大縮瞳時の瞳孔径の変化率(最大縮瞳率)や時間経過を算出した。

網膜電図は、誘発反応記録装置(PuREC、メイヨー)及び皮膚電極を用いて測定し、加算平均処理を行った後、a波及びb波の振幅(a、b)、明順応下陰性反応(PhNR)の最大振幅(PhNRmax)や、それぞれの潜時を算出した。

脳波(Fz、C3、Cz、C4、Pz、O1、O2部位)の視覚誘発電位は、生体信号集録・解析システム(MP150システム、BIOPAC Systems)を用いて測定し、加算平均処理を行った後、振幅と潜時を算出した。網膜電図及び脳波の測定におけるパルス光の照射間隔は1.5~2.5sでランダムであり、照射回数は210回であった。

主観評価はVisual Analog Scale(VAS)法を用いて青み及び緑みスコアを測定した。

各指標に対して反復測定分散分析と多重比較検定(Bonferroni)を行った。有意水準は5%とした。

明順応	瞳孔径	休憩	網膜電図、脳波	主観評価
10分	10分	10分	90分	

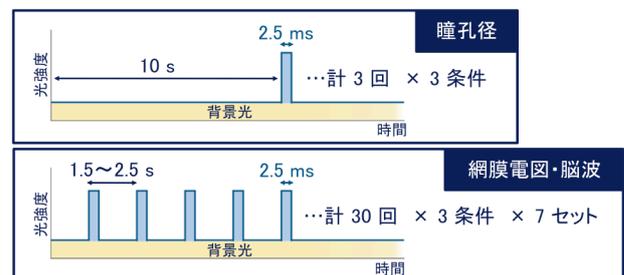


図3 上段: 実験手順、中段: 瞳孔径測定時の刺激提示方法、下段: 網膜電図及び脳波測定時の刺激提示方法

■結果

網膜電図

加算平均処理を行った網膜電図の波形を図4に示す。網膜電図において、a波の振幅(a)は青+緑条件にて青条件や緑条件よりも有意に大きくなった(図5)。b波(b/|a|)では、青+緑条件は青条件よりも有意に小さくなった(図6)。PhNR(PhNRmax/b)では、青+緑条件と青条件の間に有意な差は見られなかった(図7)。

瞳孔径

瞳孔径において、最大縮瞳率の結果から、青+緑条件にて青条件よりも有意に縮瞳が抑制されることが示された(図 8)。縮瞳回復時間は、青+緑条件にて青条件よりも有意に短くなった。

脳波

脳波(視覚誘発電位)において、刺激から約 100 ms 後の陽性成分(P100)のFz、C3及びCz部位における振幅は、青+緑条件にて青条件よりも有意に大きくなった(図 9)。その他の成分の振幅や潜時では、青+緑条件と青条件の間で有意な差は見られなかった。

主観評価

主観評価において、青みでは、青+緑条件と青条件の間に有意な差は見られなかった(図 10)。緑みでは、青+緑条件と青条件の間に有意な差は見られなかった。

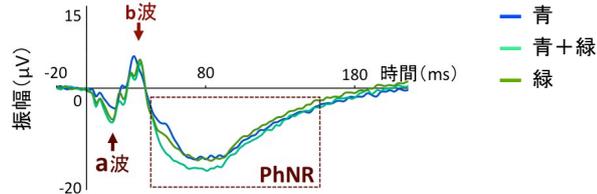


図 4 網膜電図(全被験者平均)

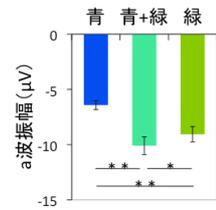


図 5 網膜電図 a 波

(mean±SE, **:p<0.01, *:p<0.05)

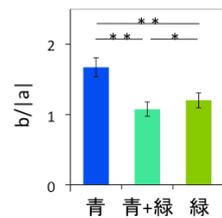


図 6 網膜電図 b 波(b/|a|)

(mean±SE, **:p<0.01, *:p<0.05)

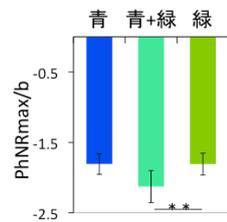


図 7 網膜電図 PhNR

(PhNRmax/b)

(mean±SE, **:p<0.01)

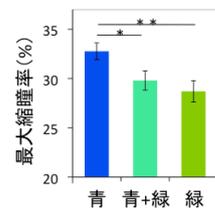


図 8 最大縮瞳率

(mean±SE, **:p<0.01, *:p<0.05)

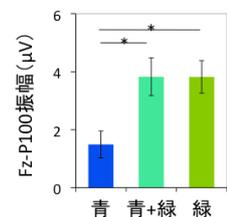


図 9 視覚誘発電位

(Fz 部位 P100 振幅)

(mean±SE, *:p<0.05)

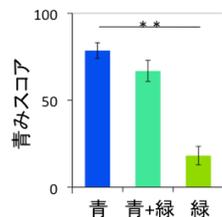


図 10 青みスコア

(mean±SE, **:p<0.01)

■考察

網膜電図において、光情報の初期の受容器である視細胞の反応を示す a 波には、劣加法性は現れず、強度に依存した反応が見られた。双極細胞等の働きを反映する b 波にて⁸⁾劣加法性が確認された。

ipRGC を含めた神経節細胞全体の応答が反映される⁹⁾PhNR では、明確な劣加法性は示されなかった。

縮瞳においては、青色及び緑色の混合パルス光にて青色パルス光よりも反応が抑制され、劣加法性が確認された。先行研究において、覚醒水準や⁷⁾メラトニン分泌の抑制⁶⁾においても劣加法性が報告されており、これらの非視覚的作用は ipRGC に起因する³⁾⁴⁾。

また、脳波の視覚誘発電位や色みの知覚が示す視覚作用においては、明確な劣加法性が得られなかった。

以上から、劣加法性は、双極細胞から ipRGC へ光情報が伝達される途中で生じることが示唆された(図 11)。

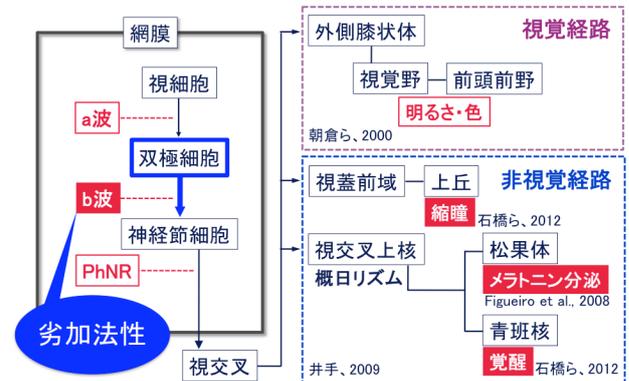


図 11 光情報の経路の概略及び劣加法性の発生が予測される段階 (□:劣加法性が示されなかった指標、■:劣加法性が示された指標)

■まとめ

日中の明順応状態において、パルス光照射時の反応を、受容器レベルの活動や自律的な対光反射、中枢神経活動、主観評価といった異なる指標で評価した。縮瞳及び網膜電図の陽性波において、青色及び緑色パルス光を同時に照射すると、作用の減弱、すなわち光の劣加法性が確認された。また、劣加法性は非視覚的作用のみにおいて見られ、視覚的作用では生じないことが示された。さらに、劣加法性は網膜上で起こることが示唆された。

■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) Lockely et al., High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light, The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism, 88(9), 4502-4505, 2003
- 4) Lucas et al., Diminished pupillary light reflex at high irradiances in melanopsin-knockout mice, Science, 299(5604), 245-247, 2003
- 5) Katsuura et al., Effect of blue pulsed light on human physiological functions and subjective evaluations, Journal of Physiological Anthropology, 31(23), 2012
- 6) Figueiro et al., Retinal mechanisms determine the subadditive response to polychromatic light by the human circadian system, Neuroscience Letters, 438, 242-245, 2008
- 7) 石橋ら, LED 照明の瞳孔径反応における劣加法性評価, 日本人間工学会関東支部大会講演集, 42, 58-59, 2012
- 8) Stockton&Slaughter, B-wave of the electroretinogram. A reflection of ON bipolar cell activity, The Journal of general physiology, 93(1), 101-122, 1989
- 9) Viswanathan et al., The photopic negative response of the macaque electroretinogram: reduction by experimental glaucoma, Investigative ophthalmology & visual science, 40(6), 1124-1136, 1999