

査読論文

一対比較法と心拍変動解析を用いた生体評価の基礎的研究 ～女性が有彩色光照明から受ける影響～

An Exploratory Study on Physiological Evaluation
by Paired Comparison Test and Heart Rate Variability:
Effects of Chromatic Lights on Females

野本 洋平・大無田 孝夫・大矢 哲也・川澄 正史

NOMOTO Yohei¹, OHMUTA Takao², OHYA Tetsuya³, KAWASUMI Masashi⁴

The popularization of LEDs and the development of the control technology of these lights provides chromatic lights such as a red, blue, green. The chromatic lights are expected from the psychology and the physiological effect of color. And it is predicted that chromatic lights can be innovated positively into a life space. This research about the image of chromatic lights, is examined using heart rate variability and psychological methodology, i.e., paired comparison tests. The subjects of the paired comparison test were 19 healthy participants (age 22.5 ± 6.6 years old). The subjects of heart rate variability were 6 healthy participants (age 21.5 ± 1.1 years old). We examined them from two viewpoints: 1.) In the results of the paired comparison test, the scores for white-ice, yellow and green demonstrated greater scores compared with the other. The scores for green, red and pink decreased to lower values compared with the other. 2.) In the results of heart rate variability, the mean values of HF of green demonstrated greater values compared with the other. The mean values of HF of red, white-ice and yellow decreased to lower values compared with the other. As a result, it was found that the effects of chromatic light on males and female are different.

キーワード： 有彩色光照明、一対比較法、心拍変動解析

Key words: chromatic light, paired comparison test, heart rate variability

1 はじめに

近年、光源の発展と普及により有彩色光照明は、色の持つ心理および生理的效果が期待され、生活空間に積極的に導入されていくことが予測される。生活空間における快適な環境を実現するためには、照明や壁面、床面の色や素材から受ける影響を明らかにする必要がある。一方、照明で検討が必要な要因は、輝度、輝度分布、演色性、色温度、照度、照度分布とされているが^[1]、生活空間で一般的に使用される照明の光源は、消費電力数や色温度の違いによってさまざまな種類があり、照度を自由に調節できる家庭は多くない。

我々はこれまでに、一般家庭でも手軽に使用できる有彩色光照明を用いて、男性を対象として、一対比較法と心拍変動解析を用いた主観・客観の評価を行った。その結果、有彩色光照明が生体に及ぼす影響について検討する評価手法として、一対比較法と心拍変動解析が有用であることを確認した^[2]。しかし、公共の空間も含めた生活空間において、使用する有彩色光照明から受ける影響の男女差が大きいことは望ましくないと考え、本研究では、女性に対して先行研究で用いた一対比較

法と心拍変動解析を用いて評価した。本研究では性差も考慮した個人差の影響の少ない一般的な評価方法の確立を目指している。

なお、本研究は新潟県立大学倫理委員会（1203）および東京電機大学ヒト生命倫理審査委員会（22-42）の承認を得て、対象者には事前に十分な説明とインフォームドコンセントを実施して行った。

2 一対比較法を用いた印象評価

2-1 一対比較法

人の感性はたくさんのものを一度に比較し順位をつけることは不得意だが、二つのものを比較して優劣を判断する能力には優れている。そのため、この能力を利用して人の感性の順位付けとその関連性を調べる手法として一対比較法が用いられる。

2-2 対象および方法

対象は本学の19～48歳（平均年齢 22.5 ± 6.6 歳）の健常女性である。なお、先行研究において、男性対象者は14名であったため、比較検討を行うことを考慮して女性対象者を19名とした。表1に各有彩色光照明の輝度、照度、色度を、表2に検討に用いた七つの有彩色光照明の分光分布、図1に実験風景を示す。輝度は輝度計（コニカミノルタ社製、LS-100）、照度はデジタル照度計（コニカミノルタ社製、T-1）により測定した。また輝度と照度の測定は、座位の姿勢では目線高さの位置となる床面から1.0mの高さで行った。ブース内の背景色は有彩色光照明の光が反射しにくい黒色とした。また対象の実験環境（暗室、温度、湿度）への順応を考慮し、実験の説明も兼ねて最低でも5分間の順応時間を設けた。対象者には有彩色光照明が点灯している間、実験ブース内で座位にて前方を注視するように指示した。さらに各有彩色光照明（白、黄、橙、緑、青、桃、赤）の提示方法は、比較するペアを口頭で伝え、ペアの光源を一つずつ提示し、どちらの光源が①快適、②安心であるかを判定させ、判定までの時間制限は設けず、さらに対象者から要求があれば何度でも提示した。アンケート項目における①快適とは、実験ブースへの親和性を、②安心とは、実験ブースにおける開放感をそれぞれ意味している。なお、実験は全ての有彩色光照明の組み合わせ二十一通りを三回行い、提示するペアの有彩色光照明の順序は無作為とした。

表1 各有彩色光照明の輝度、照度、色度

色	色度		輝度[cd/m ²]	照度[lx]
	x	y		
橙	0.555	0.416	5560	210
青	0.157	0.079	4092	150
赤	0.577	0.286	3968	129
桃	0.517	0.244	3610	124
緑	0.250	0.631	1898	680
黄	0.408	0.477	1554	601
白	0.285	0.283	1231	450

表2 七つの有彩色光照明の分光分布

有彩色光照明	分光分布 [nm]
白	453、544、611
黄	544、611
橙	544、622
緑	544
青	453
桃	658
赤	658



図1 実験風景

2-3 快適感・安心感の得点化

対象者より得られた一対比較法の結果から、各有彩色光照明の①快適感および②安心感を定量的に評価するためにサーストンの方法を用いて得点化した^{[3][4]}。この方法では有彩色光照明*i*と有彩色光照明*j*の光源を比較したときに有彩色光照明*i*が選ばれる確立を*P_{ij}*とし、標準正規分布を仮定して $|P_{ij} - 0.5|$ に対応する*Z*値を求め、

$$Z_{ij} = -Z \quad \text{ただし } P_{ij} - 0.5 < 0,$$

$$Z_{ij} = Z \quad \text{ただし } P_{ij} - 0.5 > 0$$

とする。比較する有彩色光照明が全部で*a*色あるとすると、色*i*の得点*Z_i*は

$$Z_i = \sum_{j=1}^a \frac{Z_{ij}}{a-1} \quad \dots\dots\dots (1)$$

により求まる。ただし、*P_{ij}* = 1 のときは*Z_i* = ∞、*P_{ij}* = 0 のとき*Z_i* = -∞となるので、*P_{ij}* = 1 のとき*Z_{ij}* = 4、*P_{ij}* = 0 のとき*Z_i* = -4と近似した。これにより評価対象の色*i*が持つ得点*Z_i*は最高で4点、最低で-4点となる。

2-4 一対比較法の実験結果

表3は一対比較法にサーストンの方法を適用して求めた各有彩色光照明の①快適感、②安心感の得点で、得点が高いほど快適感、安心感が高いことを示す。検定は対応のある*t*検定を用いて危険率5%以下を有意差があると認めることとした。

表3の快適感の結果について、白、黄、橙、緑は赤の有彩色光照明に比して有意に高い値であった。一方、安心感では橙、白、青、黄、緑は赤、桃の有彩色光照明に比して有意に高い値であった。

3 心拍変動解析を用いた評価

3-1 心拍変動解析

心拍変動は中枢神経系に起因して、末梢自律神経を介してコントロールされているため、心拍変

表3 一対比較法の結果

① 快適感の結果		② 安心感の結果	
有彩色光照明	平均値±標準偏差	有彩色光照明	平均値±標準偏差
白	2.1 ± 1.4	橙	1.2 ± 1.3
黄	0.9 ± 1.6	白	0.7 ± 0.7
橙	0.8 ± 1.6	青	0.4 ± 0.7
緑	0.7 ± 1.9	黄	0.4 ± 0.7
青	0.4 ± 0.8	緑	0.1 ± 0.8
桃	-2.1 ± 1.4	赤	-1.0 ± 0.6
赤	-2.5 ± 1.4	桃	-1.7 ± 1.1

動解析が自律神経機能評価によく利用されている。

心拍間隔を経過時間に対してプロットしていくことによって、心拍の持続的な変動（心拍変動）を観察することができる。この心拍変動の周波数特性を調べることで、大きく分けて二つの周波数成分に分けることができる。一つは呼吸成分の影響を強く受ける0.15Hz以上の高周波成分（HF成分）である。他方は心臓血圧調節系の影響を受けるといわれている0.15Hz以下の低周波成分（LF成分）である。このLF成分は交感神経と副交感神経の両方の活動に対応し、一方HF成分は副交感神経のみの活動に対応していることが知られている^[5]。副交感神経は安静時やリラックス時に優位に働くとされており、HF成分を調べることで、自律神経系活動を間接的に観察し、対象者の状態を計測できると考えられるため、本研究では副交感神経活動指標HF成分のみを用いて検討を行った。

3-2 対象および方法

対象は「2. 一対比較法を用いた印象評価」を行った者で体動等が少なく心電図計測が行えた21～24歳の健常女性6名（平均年齢21.5±1.1歳）である。図3に実験プロトコルを示す。心電図は自然呼吸化の安静座位で、第Ⅱ誘導心電図を日本光電社製マルチテレメーターシステムWEB-5000によりサンプリング周波数1kHzでコンピュータを用いてデジタル連続記録を行った。検討に用いた七つの有彩色光照明および実験ブースは、「2. 一対比較法を用いた印象評価」と同様とした。対象者には暗幕で仕切られたブース内で座位にて前方を注視するように指示した。照明の提示は、最初に一般的に多く利用されている基準の白色の照明（FL20SW）をコントロールとして5分間、その後、2分間の安静後に課題として有彩色光照明を5分間、再び安静2分間とし、これを各有彩色光照明で実施した。なおコントロール後の課題提示は長時間におよぶため、ストレスの影響を考慮しランダムとした。

心拍変動解析では、心電図RR間隔から心拍変動図を作成し1Hzで再サンプリングを行った後、Complex demodulation法^[6]を用いて副交感神経活動指標HF成分を求めた。なお、HF成分の算出に用いた解析区間は課題の開始120秒後から270秒の間とした。Complex demodulation法は周波数解析の弱点を補うために開発された時間領域の解析方法であり、心拍変動のLF、HF成分の周波数における振幅の変化を時間の関数として連続的に分析する方法である。上記により求めた各有彩色光照明のHF成分の評価には、コントロール（FL20SW使用時）のHF成分の値で各有彩色光のHF成分の値を除して正規化を行った。

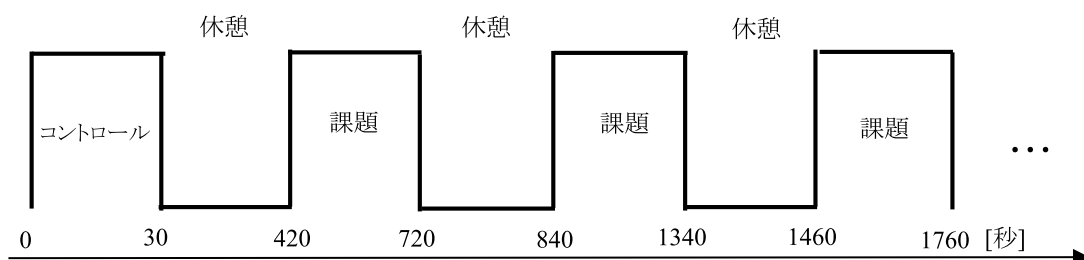


図3 実験プロトコル

3-3 心拍変動解析結果

各有彩色光照明の心拍変動解析による6名のHF成分の平均値と標準偏差を表4に示す。検定はWilcoxon signed rank testを用いて危険率5%以下を有意差があると認めることにした。緑の有彩色光照明のみHF成分の値はコントロールに比して3%増加した。白のHF成分の値はコントロールに比して21%低下した。なお、白のHF成分の値は、緑と橙のHF成分の値と比較して、有意に低い値であった。

表4 HF成分の平均値と標準偏差

有彩色光照明		平均値±標準偏差
*	緑	1.03 ± 0.29
	橙	0.94 ± 0.23
	青	0.92 ± 0.16
	桃	0.87 ± 0.31
	黄	0.82 ± 0.17
	赤	0.80 ± 0.17
	白	0.79 ± 0.11

4 考察

4-1 一対比較法の実験の一貫性

一対比較法は、同時に二つの物を比較して、どちらか一方を選択することで全体の対象物に対して順序付けを行うものである。例えば、 $A < B$ 、 $B < C$ 、 $A < C$ という選択がされると、 $A < B < C$ という順序付けがされるが、 $A < B$ 、 $B < C$ 、 $C < A$ といった選択がされた場合に、選択の順序が一巡してしまい順序に矛盾が生じる一巡三角形となる。本実験の一対比較法の実験結果でも、同系色の有彩色光照明では判定が曖昧で順位付けの矛盾が生じていることが懸念される。そこで、得られた一対比較法実験の結果に一貫性があるかどうかをKendallの一貫性係数を用いて評価することにした。

(1) Kendallの一貫性係数

比較した有彩色光照明の数を k 色、その中の i 番目の有彩色光照明が選択された回数を a_i 回としたとき、順位が一巡してしまう一巡三角形の個数 d は

$$d = \frac{1}{6} k (k-1) (k-2) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k a_i (a_i - 1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となり、Kendallの一貫性係数 ξ は

$$k \text{ が奇数の場合: } \xi = 1 - \frac{24d}{k^3 - k} \quad \dots\dots\dots (3)$$

より求まる^{[7][8]}。一貫性係数が1に近いほど一対比較法の結果が首尾一貫していることを意味する。

(2) 一対比較法実験の一貫性評価

一対比較法実験における各対象者の一貫性係数を図4に示す。①快適感・②安心感ともに対象者19名中8名で有彩色光照明の順位判定に一貫性があった。①快適感において対象者I、Mが他の対象者に比して低い値を示した。これらの対象者は同率2位や3位といった有彩色光照明の順位付けを行っていた。これらの結果が表3に示したサーストンの得点において黄、橙で類似した点数を示したことを裏付ける結果と考えられる。

4-2 有彩色光照明に関する男女差について

(1) 一対比較法実験

今回の女性対象者における検討において、快適感・安心感ともに、赤、桃色の有彩色光照明で負の値を示しており、これは先行研究の男性対象者と同様の傾向を示した。さらに快適感については男女において同様な傾向を示した。

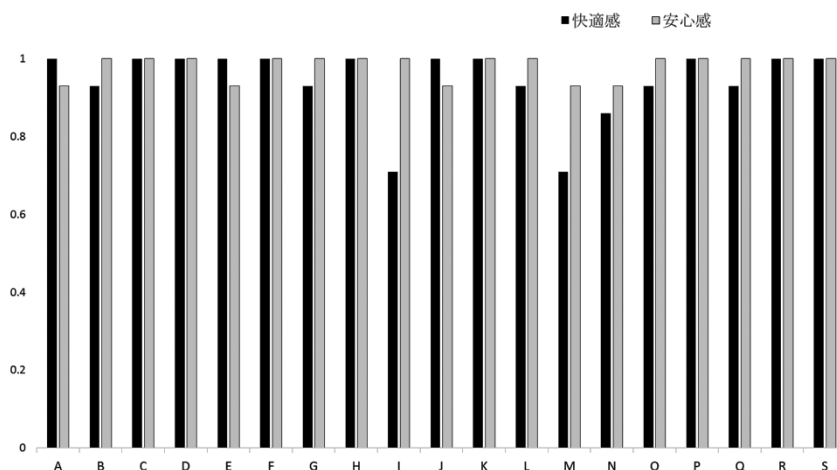


図4 一貫性評価の結果

先行研究の男性対象者において、①快適感、②安心感における一貫性係数が低い対象者に着目すると、14名中4名(29%)であった。一方、女性対象者は19名中11名(58%)であり、男性対象者と比較すると一貫性が低い傾向であった。

なお、一対比較法では、アンケート結果を定量的に評価するために各有彩色光で1つの得点化を行っているため、男女間における有意差検定は行えないので有彩色光の順位を比較して傾向を確認するまでに留めた。

① 心拍変動解析

我々はこれまでに、男性対象者に対して客観評価である副交感神経活動指標HF成分において寒色系、暖色系の照明のHF成分の値が低く、中性色の照明のHF成分の値が高い傾向を確認した。なお、青色の有彩色光照明のみ基準である白色の蛍光灯より低値(1以下の値)であった。一方、今回の女性対象者のHF成分の結果では、緑色の有彩色光照明のみ基準の白色の蛍光灯より高値(1以上の値)であった。

② 総合的な評価

リラックス状態やストレス状態は、脳(中枢神経系)、自律神経系、内分泌系の協調によって調整されており、心拍変動の副交感神経活動指標HF(高周波:0.15~0.5Hz)成分が、生体リズムを緩徐にする働きを反映することが知られている。そのため本論文でも客観的な指標として計測した。比較的、男性対象者では一対比較法実験と心拍変動解析の結果が近い傾向を示していた。一方、女性対象者においては、一対比較法実験においては、日常よく用いられる蛍光灯に近い白色の有彩色光照明が①快適感②安心感ともに高値を示し、心拍変動解析においては、ほとんどの有彩色光照明が基準である日常よく用いられる蛍光灯よりも低く(1以下)、一対比較法実験と心拍変動解析の結果が異なる傾向を示した。理由として、男性対象者では一貫性が高かったことより、一対比較法実験と心拍変動解析の結果が同じ傾向であったが、女性対象者では一貫性が低かったため、一対比較法実験と心拍変動解析の結果が異なる傾向になった。以上より、対象者の主観の影響が強く一貫性が得られにくい感性実験などにおいては、本評価方法に加えて感覚器のより上位に位置する脳活動を考慮した評価が必要であると考ええる。

脳(中枢神経系)はホメオスタシスにおいて、各系でも中心的な役割を担っている。自律神経系活動は脳の命令や、各内分泌系による2次的な活動を反映している。本来ならば脳の根本的な活動から、快適感や安心感を推定できることが望ましい。例えば、精神疾患やストレス状態に対する指標として、聴覚反応であるP50mとN1m反応がよく利用されている。P50m、N1mは聴覚性感覚ゲーティングを反映する可能性が報告されており、連続音を呈示した際の活動変化が報告されている^{[9][10]}。しかしながら、脳については自律神経系と密接な関係があるにも関わらず、脳活動から快適感や安心感を推定する方法は明らかにされていない。すなわち、安心感や快適感の脳活動が、自律神経系に連動してどのように変化するかを調べることも重要であると考ええる。現在、我々是有彩色光照明が生体に与える影響について、脳活動との関連からも検討を行っている^{[11][12]}。

5 まとめ

本報告では、一般家庭でも手軽に使用できる有彩色光照明を用いて、女性に対する感性的な評価データを集める手法として、アンケートを一対比較法にて、一般的に生体指標としてよく用いられ

る自律神経活動を心拍変動解析にてそれぞれ定量的な評価を行った。その結果、以下に示すことが明らかになった。

- ① 主観評価である一対比較法において、快適性の順位では白、安心性の順位では橙の有彩色光照明であった。
- ② 客観評価である副交感神経活動指標HF成分において緑の有彩色光照明のHF成分の値が高い傾向であった。

本研究では、一対比較法と心拍変動解析を用いて有彩色光照明が生体に及ぼす影響について検討を行い、有彩色光照明が生体に及ぼす影響およびその感じ方において性差があることが示唆された。

謝 辞

本研究のもととなった多くのデータの計測に協力された新潟県立大学および東京電機大学の学生諸氏に深謝します。本研究の一部は、新潟県立大学教育研究活動推進事業、公益財団法人内田エネルギー科学振興財団として行った。

参考文献

- [1] 中村肇・唐沢宣典：「照度・色温度と雰囲気の好ましさの関係」，照明学会誌 Vol.81, No.8A, pp.69-76 (1997)
- [2] 野本洋平・大無田孝夫・大矢哲也・小山裕徳・川澄正史：「一対比較と心拍変動解析を用いた生体評価の基礎的検討—有彩色照明が生体に与える影響—」，電気学会論文誌C Vol.133, No.2, pp.283-288 (2013)
- [3] L.L.Thurstone: "A law of comparative judgment", Psycho.Rev., Vol.34 (1927)
- [4] L.L.Thurstone: "The measurement of values", Univ of Chicago, Press (Chapter 3) (1959)
- [5] 井上博：「循環器疾患と自律神経機能」，医学書院，pp.91-94 (1996)
- [6] 早野順一郎：「ホルター心電図処理による自律神経活動の分析とその臨床応用—心拍変動のcomplex demodulation—」，BME, Vol.7, No.2 (1993)
- [7] 心理学実験指導研究会編：「実験とテスト：心理学の基礎（実習編）」，培風館，pp.73-76 (1985)
- [8] 心理学実験指導研究会編：「実験とテスト：心理学の基礎（解説編）」，培風館，pp.147-153 (1985)
- [9] 石井良平：「脳磁図の臨床応用に関する文献レビュー（第4報）」，精神疾患・認知症. 臨床生理学Vol.41, pp.29-45 (2013)
- [10] 岡本泰昌：「ストレスの適応破綻の脳内メカニズムfMRIとMEGを用いた脳機能画像解析」，心身医第Vol.44, pp.186-192 (2004)
- [11] 志村悠・青山敦・大無田孝夫・野本洋平・小山裕徳・川澄正史：「リラックス状態の制御下における聴覚誘発脳磁界と心電図に関する研究」，第24回ライフサポート学会フロンティア講演会 CD-ROM (2015)
- [12] Atsushi Aoyama・Yu Shimura・Takao Ohmura・Yohei Nomoto・Masashi Kawasumi：「Parasympathetic activation enhanced by slow respiration modulates early auditory sensory gating」，Neuro Report (in press)

注

- 1 新潟県立大学 国際地域学部 国際地域学科 (nomoto@unii.ac.jp)
- 2 鈴鹿医療科学大学 医用工学部 臨床工学科
- 3 日本医療科学大学 保健医療学部 臨床工学科
- 4 東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科