

[研究助成 (A)]

先天性色覚障がい者の色識別能力を改善する 演色性の良い照明光源の試作

Combination of LED lights to improve the color discrimination for people with color blindness

2201010



研究代表者

和歌山県立医科大学 医学部

教授

茂里 康

[研究の目的]

先天性色覚障がい者、いわゆる赤緑色盲は男性の6~8%が該当するといわれている [1]。そのタイプはI型とII型に区別され、石原式色覚検査表・SPP-1に代表される色覚検査表は、色覚障がい者にとって識別困難な色の組み合わせの究極事例であり、通常的环境光下では正しく読めない。以前カラーLED光を利用することにより、II型色覚者の色識別能力が改善されることを見出し [2]、さらに波長が600 nm以上の赤色LED光の利用が有効であることを見出した [3]。この実験では、7種類の波長(色)のカラーLED光のみを単独で使用した。しかしながら、単色光のみの光環境下では部屋全体の色に偏りが生じ、また光源の演色性も悪い事が懸念される。例えば波長が630 nmのみを点灯した場合、II型色覚障がい者の石原式色覚検査表の正答率は75%に改善されるが平均演色評価数(Ra)は15.4と低い(蛍光灯ではRaは60程度、白色LEDでは90程度である)。そこでまず2種のLED光のみを利用した場合について、II型色覚者に加えI型色覚者の色識別能力が改善どのようになるかを、人間工学実験と理論とによって検証する事にする。また我々が物体(非発光)を見る時には、太陽光や人工光源に照らされた結果の色によって配色の判断を行う。光によって異なる物体色の見え方を演色、あるいは演色性という [4]。光源の特

性を数値化する方法として、演色評価数がある。そこで演色性を考慮した光源についてシミュレーション画像を利用する人間工学実験によって効果を検証した。

[研究の内容、成果]

石原式色覚検査表を用いた実験では、28種類の照明条件下(LED波長660, 660+630, 660+605, 660+590, 660+525, 660+470, 660+450; for 630, 630+605, 630+590, 630+525, 630+470, 630+450; for 605, 605+590, 605+525, 605+470, 605+450; for 590, 590+525, 590+470, 590+450; for 525, 525+470, 525+450; for 470, 470+450; and 450 nm)で、6人のI型色覚障がい者(protan)と8人のII型色覚障がい者(deutan)と11人の正常色覚者で実験を実施した。その際の誤答率を図1に記載した。その結果、昼光色のD65蛍光灯(300 lx)では、11人の正常色覚者の誤答率は0%であった。一方、I型色覚障がい者とII型色覚障がい者の誤答率は、それぞれ98.9%と86.7%であった。これらの結果から、石原式色覚検査表が、赤・緑の色覚異常のスクリーニングに適していることが確認された。次に28種類の照明条件下では、正常色覚者は、メインのLEDの波長が660, 630, 605 nmの場合、サブのLEDの波長に関わらず誤答率は0%でした。一方I型色覚障がい者とII型色覚障がい者の場

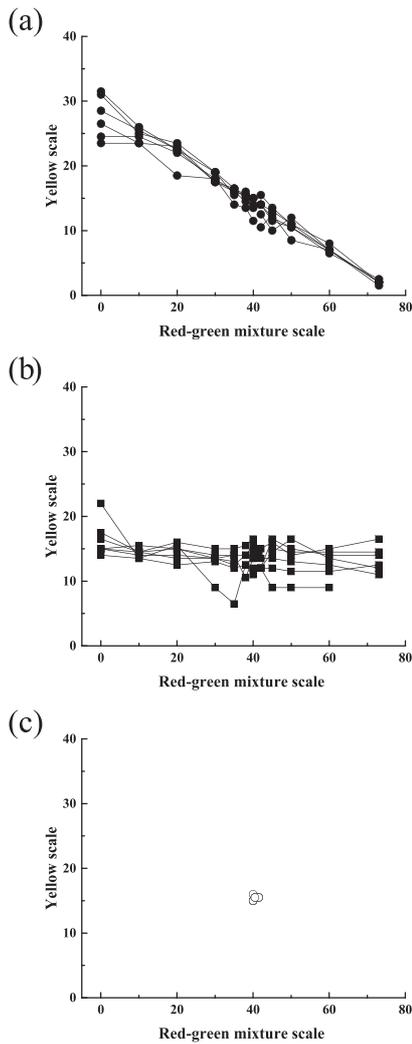


図 1

合、メインの LED の波長が 660 nm, 630 nm, 605 nm で、サブの LED の波長が 590 nm 以上の場合、誤答率は 20% 以下でした。特にサブの LED の波長が 590 nm の場合、I 型色覚障がい者の誤答率は、II 型色覚障がい者の誤答率よりも著しく大きかった。つまり I 型色覚障がい者は、長波長に対する感度、すなわち赤色色素を持たないため、正しく識別するためには、II 型色覚障がい者よりも明るい赤色光を必要とする可能性がある。それとは対照的に、サブの LED の波長が 525 nm のいわゆる緑色の光の場合、I 型色覚障がい者の誤答率 (660+525 nm で 96.7%, 630+525 nm で 100%, 605+525 nm で 92.2%) と II 型色覚障がい者の誤答率 (660+525 nm で 44.2%, 630+525 nm で 11.7%,

605+525 nm で 16.7%) が著しく上昇した。これまで、より長波長 (630 nm または 660 nm) の LED 光を照射すると、石原式色覚検査表および Farnsworth Panel D-15 テストにおいて、II 型色覚障がい者の赤-緑識別能力が向上することを報告した [3]。従って、525 nm の LED 光 (緑色の光) は、I 型色覚障がい者 (赤盲目) と II 型色覚障がい者 (緑盲目) の両方に対して、より長い波長の LED 光の効果 (誤答率を下げる) を打ち消す可能性がある。I 型色覚障がい者と II 型色覚障がい者の間では、サブの LED の波長が 525 nm、メイン LED の波長が 660 nm, 630 nm, 605 nm の場合、I 型色覚障がい者の誤答率が II 型色覚障がい者の誤答率よりも大きくなった。サブの LED の波長が 525 nm での誤答率に比べて、470 nm または 450 nm での波長の LED の場合、誤答率は I 型及び II 型色覚障がい者は共に非常に小さかった。特に、I 型色覚障がい者よりも II 型色覚障がい者の誤答率は小さく、サブの LED の波長が 470 nm または 450 nm の場合、10% 以下であった。メインの LED の波長が 590 nm の場合、図 1 に示すように、正常色覚者の誤答率は 12.7% で、I 型及び II 型色覚障がい者の誤答率よりもはるかに小さかった。また、I 型及び II 型色覚障がい者の両方において、サブの LED の波長が 525 nm の時の誤答率は、470 nm や 450 nm の場合の誤答率よりも大きかった。さらに、サブの LED のどの波長 (525, 470, 450 nm) においても、I 型色覚障がい者の誤答率は II 型色覚障がい者の誤答率よりも大きく、正常色覚者の誤答率は、I 型及び II 型色覚障がい者の誤差率よりも小さかった。またメインの LED の主波長が 525 nm, 470 nm, 450 nm の場合、正常色覚者の誤答率は 50% 以上に上昇した。同様に、I 型及び II 型色覚障がい者は健常者よりもさらに大きな誤答率を示した。理由として、I 型及び II 型色覚障がい者の光に対する感度が、正常色覚者よりも低く、石原式色覚検査表 (No. 3, 29) 等で測定した反射スペク

トルの差は、文字と背景で 20% 以下であった事が考えられる。さらに、11 人の正常色覚者、6 人の I 型色覚障がい者と 8 人の II 型色覚障がい者の、すべての石原式色覚検査表に対応する誤答率を図 2-1, 2-2, 2-3 に示した。

SPP-1 テストは、赤-緑の色覚障がい者をスクリーニングし、色覚障がい者を定性的に診断するために設計された [5]。

SPP-1 テストでは、28 種類の照明条件下で、6 人の I 型色覚障がい者、8 人の II 型色覚障がい者、11 人の正常色覚者の誤答率を図 3 に示した。D65 蛍光灯 (300 lx) の下で、正常色覚者、I 型と II 型色覚障がい者の誤答率はそれぞれ 0%, 72.2%, 92.5% であり、SPP-1 テストが先天性赤緑異常を検出するための有効なスクリーニングテストであることが確認された。

石原式色覚検査表とは異なり、メインの LED の波長が 660, 630, 605, 590 nm の場合、正常色覚者の誤答率は 20~35% であった。しかしサブの LED の波長が 525 nm の場合、正常色覚者の誤答率は 0% に減少した。図 4-1 には、様々な LED 照射条件の元で、すべての SPP-1 テストに対応する正常色覚者 11 人の平

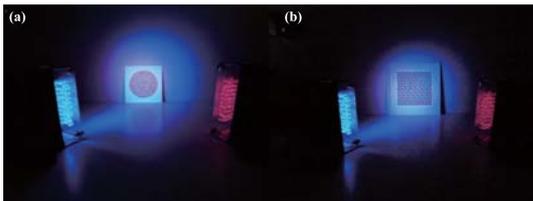


図 2

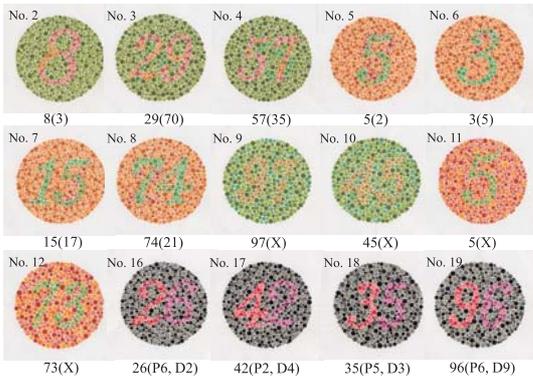


図 3

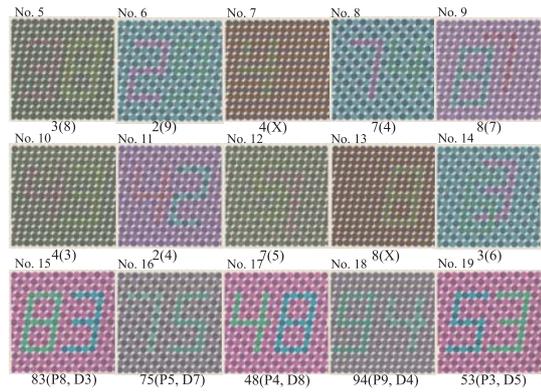


図 4

均誤差率を示した。SPP-1 のテストプレート「No. 7, 4」と「No. 13, 8」では、サブの LED の波長が 630, 605, 590, 470, 450 の場合、正常色覚者の誤答率は 90% 前後と比較的高い値を示した。一方、サブの LED の波長が 525 nm の場合、正常色覚者の誤答率は 0% でした。そこで、SPP-1 のテストプレート「No. 13, 8」をさらに分析し、テストプレート「No. 13, 8」のドットの CIELAB 座標の L^* , a^* , b^* 値を算出した。LED (660, 660+590, 660+525, 660+470 nm) と D65 蛍光灯の強度分布は、照度分光計 CL-500A (コニカミノルタ社製) で観察した。また、のテストプレート「No. 13, 8」の反射スペクトルを分光測色計 CD100 (横河計測社製) で測定した。計算式 [6] に従って算出した CIELAB 値を図 5 に示す。

図 5 に示したように、サブの LED の波長 525 nm において、数字 (■) と背景のドット (□) の a^* と b^* の値が比較的離れていた。つ

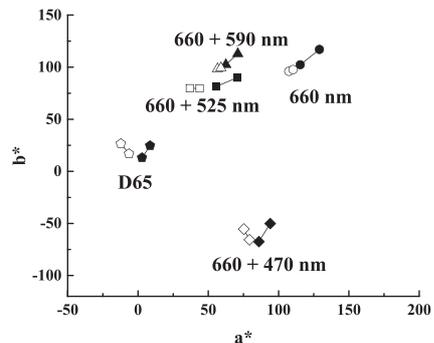


図 5

まりサブの LED が 525 nm の場合、正常色覚者は SPP-1 テストでより良い識別力を示すことが示唆された。また図 3 に示した様に、I 型と II 型色覚障がい者の場合、メインの LED の波長が 660, 630, 605, 590 nm で、サブの LED の波長が 590 nm より大きい場合は、正常色覚者と同様に、誤答率が 20~40% となった。サブの LED の波長が 525 nm の場合は、石原式色覚検査表と同様に I 型と II 型色覚障がい者の誤答率が 50% 以上増加し、525 nm の波長の LED (緑色光) が、波長の長い LED による誤答率を低下する効果を打ち消している事が判った。サブの LED の波長が 470 nm または 450 nm の場合、I 型と II 型色覚障がい者のいずれも、525 nm の LED の場合と同程度かそれ以上の誤答率となった。メインの LED の波長が 525, 470, 450 nm の場合、図 3 に示すように、正常色覚者、I 型と II 型色覚障がい者の各被験者の誤答率に有意な差は見られなかった。さらに、すべての SPP-1 テストプレートに対応する正常色覚者 11 名、I 型色覚障がい者 6 名、II 型色覚障がい者 8 名の誤答率を、石原式色覚検査表と同様に図 4-1, 4-2, 4-3 に示した。

LED 照明が I 型と II 型色覚障がい者等の色覚障がい者の色識別に及ぼす影響を調べるために、7 種類の LED (660, 630, 605, 590, 525, 470, 450 nm) を組み合わせた 28 種類の照明実験を、石原式色覚検査表と SPP-1 テストを用いて行い、色識別能力を評価しました。メインの LED の波長が 660, 630, 605 nm、サブの LED の波長が 660, 630, 605, 590 nm の場合、I 型と II 型色覚障がい者の誤答率は、D65 蛍光灯での実験に比べて大幅に改善された。一方、525 nm のサブの LED 照明を使用した場合、I 型と II 型色覚障がい者の誤答率は、正常色覚者 (0%) に比べて大幅に増加した。これらの結果から、長波長の LED による識別能が向上する効果は、525 nm の緑色 LED によって弱められることが示唆された。それぞれの LED 照明は同じ照度 (150 lx, 合計 300 lx) を利用した

が、色覚異常者の色識別能力を向上させるためには、照度を最適化する必要がある。今後の研究では、今回の結果を高齢者にも拡大して、色覚障がい者の視覚を改善する方法をより深く理解していきたい。

上記の実験は、1 あるいは 2 種の LED のみを使用した。そのため、昼光、白色 LED、蛍光灯などと異なり、演色性が悪いことが予想される。

630 nm, 630-470 nm の光源では CIE (国際照明委員会) が定義した式で計算した演色評価数 Ra [7] は、それぞれ 15.4, 0 と悪く、特に正常色覚者にとっては、非日常的な光環境であることが判った。

Flinkman らは、23 種類の波長の LED を組み合わせ、昼光に近い色の光源を使用することで、I 型、II 型色覚者の石原式色覚検査表と Panel D-15 テストの誤答が減少することを報告している [8]。

しかしながら、色覚の改善に有効な光源の分光分布スペクトルは 3 種の LED によるもので、昼光は使用されておらず、演色性に関する記述は無い。そこで今回、下記の 2 種類の光源を、シミュレーションによって考案した。2 種類の LED の光源の実験では協力者が来所して実施したが、この方式での期間中は閉鎖空間での人同士の接触が危険なため、シミュレーションに変更した。ここでのシミュレーションとは、D65 標準光源下で認識する色覚検査票の見え方を考案したスペクトル照明環境下での見え方に変換し [9]、色覚体験ソフト Vischeck ソフト (University of California, Berkeley) で色覚障がい者の見え方を模倣し、正しく認識できるか否かを、一般色覚者が推測し、誤答率を想定するものである。演色性も、近年 CIE で新たに定義された Rf も併用した [10]。

- ・テスト照明 1 : 630 nm (105 lx) + 525 nm (170 lx) + 470 nm (25 lx)
- ・テスト照明 2 : 630 nm (170 lx) + 470 (25 lx) + 白色電球光 LED nm (105 lx)

テスト照明 1 は光の 3 原色である 3 種類の波長の LED: 赤色 (630 nm, 105 lx), 緑色 LED (525 nm, 170 lx), 青色 (470 nm, 25 lx) を使用しており, II 型色覚障がい者の誤答を減少させ, かつ, D65 の白色点 ($x=0.3127, y=0.329$) に照明の色を近づけた。検査色票上, 300 lx で測定した色座標は ($x=0.3503, y=0.3317$) であった。理論上の演色性は $R_a=50.3, R_f=69.1$ である。また, 色温度は $T_c=4704$ K である。石原式色覚検査表での II 型色覚障がい者の誤答率を 50% に減らすことを目標とした。I 型色覚障がい者の誤答率の改善は困難と予想している。

テスト照明 2 は演色性の向上と誤答率の低減を目的として試作した。2 種の LED での実験で, 赤色 LED (630 nm)+青色 LED (470 nm) では誤答率が低下したが, 演色性が悪かった。そこで, 3 番目の光源として白色 LED を併用した。この LED は 470 nm にピークを有し, かつ可視光領域全範囲の色を含むからである。検査色票上, 300 lx で測定した色座標は ($x=0.43, y=0.2544$) であった。演色性は $R_a=17.8, R_f=50.7$ である。色温度は $T_c=1701$ K である。石原式色覚検査表での II 型色覚障がい者の誤答率を 80% 減らし, I 型色覚障がい者の誤答率を 50% 減らすことを目標とした。図 6 に 2 種のテスト照明の分光スペクトルを示す。

図 7~図 15 にシミュレーションで使用した石原式色覚検査色票について, D65 標準光源, 照明 1, 照明 2 の光環境下での一般色覚障がい者, I 型色覚障がい者, II 型色覚障がい者の見え方を示す。I 型のシミュレーション図面 (図

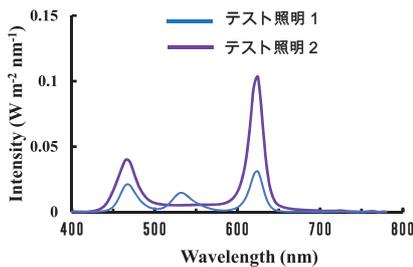


図 6 光源の分光分布スペクトル

8, 11, 14) を 3 人の一般色覚者が観察した (茂里, 多中, 田村) 結果, 正答率は 0, 0, 40% であった。II 型のシミュレーション図面 (図 9, 12, 15) を 3 人の一般色覚者が観察した結果。正答率はそれぞれ 0, 43, 67% であった。照明 1 では演色性 R_f は低圧水銀ランプ (HP1: $R_f=34.9$) よりも高く, 高圧水銀ランプ (HP4:

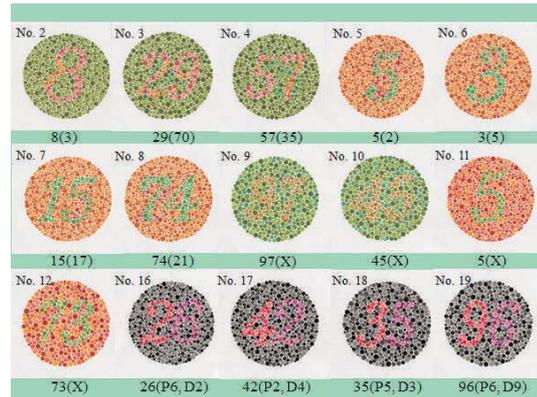


図 7 石原式色覚検査色票・D65 標準光源・一般色覚者

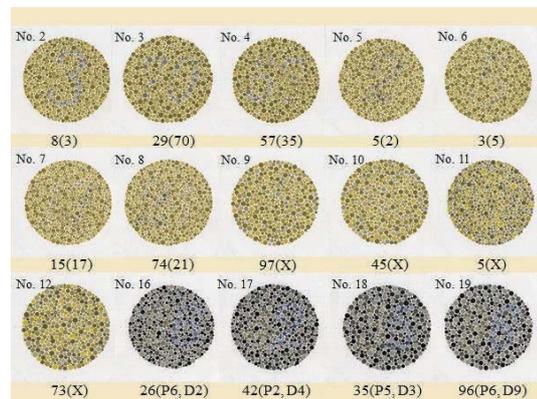


図 8 石原式色覚検査色票・D65 標準光源・I 型色覚障がい者

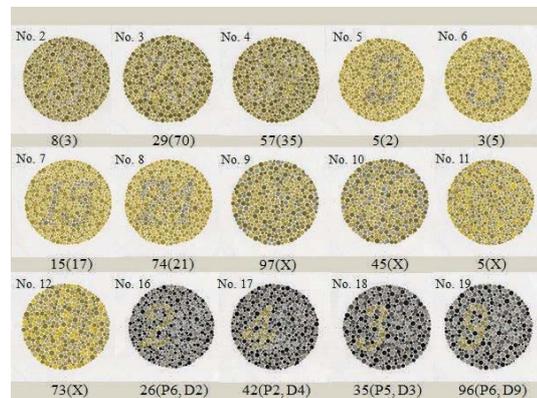


図 9 石原式色覚検査色票・D65 標準光源・II 型色覚障がい者

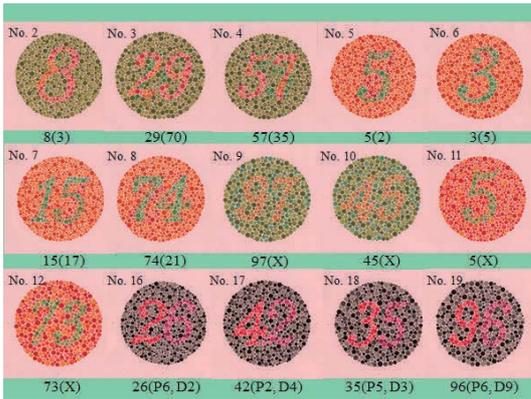


図10 石原式色覚検査色票・照明1・一般色覚者

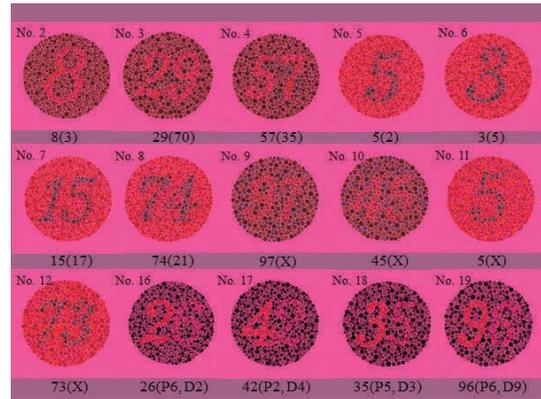


図13 石原式色覚検査色票・照明2・一般色覚者

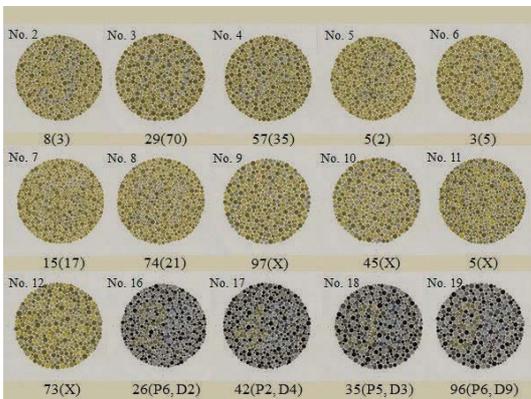


図11 石原式色覚検査色票・照明1・I型色覚障がい者

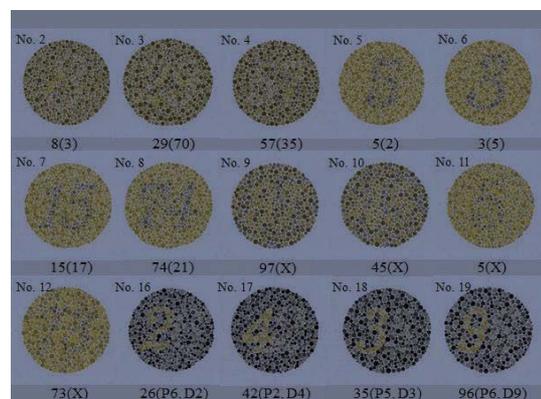


図14 石原式色覚検査色票・照明2・I型色覚障がい者

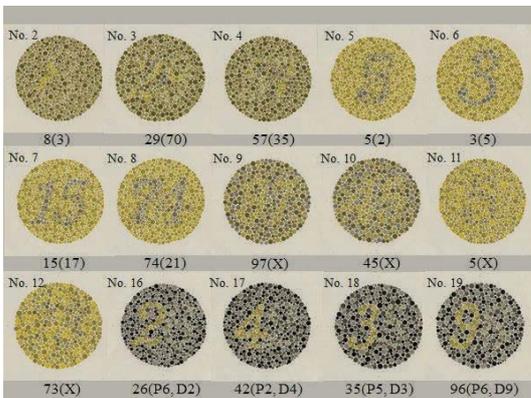


図12 石原式色覚検査色票・照明1・II型色覚障がい者

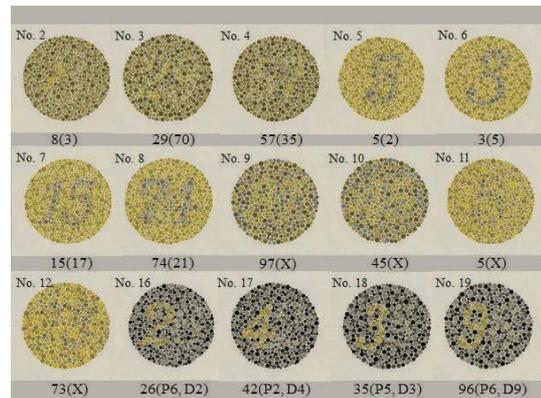


図15 石原式色覚検査色票・照明2・II型色覚障がい者

Rf=77.9)に近いが、特にI型色覚障がい者の色識別能力の向上には寄与しないことが判った。照明2では演色性Rfは照明1よりも低い、色覚障がい者の色識別能力の向上に寄与していた。色覚障がい者の色識別能力を更に向上させるためには、照明の演色性が低くなることが避けられない。

[今後の研究の方向, 課題]

先天性色覚障がい者用の照明については、特にI型色覚障がい者の誤答率の低下を目指すと、演色性も悪くなってしまう。テスト照明2はII型色覚障がい者の誤答率は5%以下で、I型色覚障がい者の誤答率も半減できたので、これ

を本プロジェクトでの提言（提案）とさせて頂きたい。提案者らは以前、後天性色覚障がい者用の照明について提案した [11]。

後天性色覚障がい者の人数は全国で 1,000 人と少ないが、65 歳以上の正常色覚者が加齢と共に同様の色覚症状を示すことが最近判明し、その数は先天性色覚障がい者よりも多く、高齢化の加速と共に、増加する。後天性色覚障がい者の間違いやすい色の識別能力を高めるのは波長が 470–590 nm の LED である。これを基に、本プロジェクトで行った異なる波長の LED を追加することにより、後天性色覚障がい者に加え、先天性色覚障がい者用の色の識別能力を向上させる光源の開発を目指したい。

[引用文献]

- [1] Birch J. *Diagnosis of Defective Colour Vision*, Second edition. Butterworth-Heinemann 2001; 51–99.
- [2] Tamura, S, Shigeri, Y. Current status of light sources to assist color identification of congenital color blindness. *J. Color Sci. Assoc. Jpn.*, 40, 167–172 (2016)
- [3] Tamura, S, Shigeri, Y., Okamoto, Y., Nakagawa, S., Sakamoto, T., Ando, M., Shigeri, Y. Light wavelengths of LEDs to improve the color discrimination in Ishihara test and Farnsworth Panel D-15 test for deuterans. *Color Res. Appl.*, 42, 424–430 (2017)

- [4] 日本色彩学会編：新編 色彩科学ハンドブック【第 2 版】. 東京大学出版会, 503 (1998)
- [5] Dain S, Gray S, Tran L. Colorimetric analysis and performance assessment of the Hahn new pseudoisochromatic colour vision test. *Color Res. Appl.*, 23, 69–77 (1998)
- [6] Green P, MacDonald L. Colour engineering: achieving device independent colour. Wiley 49–78 (2002)
- [7] Publication CIE No. 13: Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources—1st edition (1965)
- [8] Flinkman M, Nakauchi S. Illuminations that improve color discrimination ability of people with red-green color vision deficiency. *J. Opt. Soc. Am.*, A34, 1914–1923 (2017)
- [9] Tamura, S., Okamoto, Y., Shigeri, Y. Image color conversion by illumination. *J. Information Tech. Software Eng.*, 7, 1000218 (2017)
- [10] Publication CIE No. 224: CIE 2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use (2017).
- [11] Tamura, S., Shigeri, Y. Illumination to assist color identification in tritans. *J. Sci. Tech. Lighting*, 41, 53–57 (2018)

[成果の発表, 論文等]

- ・ Tamura, S., Okamoto, Y., Nakagawa, S., Sakamoto, T., Nishikawa, K., Ohyabu, S., Azumagawa, K., Tanaka, Y., and Shigeri, Y. (2022) Combination of LED lights to improve the color discrimination for people with color blindness. *J. Wakayama Med. Soc.*, 73, 15–22 (2022).