

博士學位論文

平成 26 年度

美術館・博物館における
最適な照明・色彩視環境の研究

中島由貴

女子美術大学大学院

論文要旨

美術館・博物館（以下、美術館とする）の主たる機能及び目的のひとつに美術作品の展示がある。美術館は古来受け継がれてきた貴重な美術作品を劣化させることなく一般公衆に公開し、さらなる世代へと引き継いでいく役目を担っている。ここでとりわけて重要な要素として挙げられるのが光——照明である。我々は照明光がなければ美術作品を見ることができないが、一方で照明光による光放射は美術作品の損傷や変褪色など光学的損傷を促す。すなわち、「展示」と「保存」は照明を介して常にトレード・オフの関係にある。現在、多くの美術館では、展示と保存を両立するために美術作品の耐光性ごとに照明、特に展示照度を制限している。CIE（Commission Internationale de l' Eclairage：国際照明委員会）においても展示推奨照度が提案されており、これによれば日本画など光に敏感な画材を含む美術作品の展示推奨照度は 50 lx 以下である。すなわち、耐光性の乏しい美術作品の場合、低照度下での鑑賞が余儀なくされる。

物体色の明るさ、鮮やかさは照度や輝度といった測光量の変化によって変化し、一般的に照度や輝度が低下すると物体色の明るさ、鮮やかさは低下する。また、照度・輝度の変化は視力や色弁別、色の分類、作業効率にも影響することが報告されている。美術館で展示室の照度を低く設定している場合、美術作品の色は高照度下での色よりも暗くくすみ、色から受ける印象も変化していることが推測される。

さらに、近年、技術の向上により LED ランプの応用分野は急速に広がっており、色の見えを重視する美術館照明にも高演色形の LED ランプが利用され始めている。LED ランプは美術作品の損傷、変褪色の原因となる紫外領域及び赤外領域を含まず、省エネルギーであることから新しい美術館展示用光源として期待が寄せられている。しかし、LED ランプは利用技術に関する規格類が未整備であることに加え、蛍光灯のような従来光源と発光原理、分光分布が異なることから、照明された物体の色の見え方、すなわち演色性の問題が生じる。特に美術館のように色の見えを重視する場で LED ランプを利用する場合は、その演色性及び美術作品の光学的損傷の可能性について十分に検討する必要がある。

光源の演色性を評価するには定量化された指標が必要である。光源の演色性の良し悪しを数値化して評価する方法を演色性評価方法、その指数を演色評価数といい、現在 CIE 及び JIS（日本工業規格）では色の忠実性に基づく演色性評価方法（平均演色評価数 R_a 、特殊演色評価数 R_i ）を唯一の指標として規定している。 R_a 、 R_i は測色的な色のずれ（色差）を表したものであり、その数値から色相や鮮やかさといった色のずれの方向を推量することや色

の自然らしさ、色の好ましさを色彩の主観的な印象を評価することはできない。また、 Ra 、 Ri は照度の変化による色の見えの変化を考慮していない。以上のことから、現行の演色性評価方法が抱える様々な問題点についてはこれまでも指摘されている。近年では、LED ランプが登場したことにより様々な形状の分光分布を比較的容易に実現可能となったことから、LED ランプの分光分布と色の見えの関係を検討する研究が盛んに実施され、LED ランプ照明下での主観的な見えの評価は Ra 、 Ri の数値と対応しない場合があることが報告されている。

CIE では、LED ランプが登場したことを発端に問題点を改良した新しい演色性評価方法を開発するための技術委員会 TC1-90 (Colour Fidelity Index、2012 年新設) を設置し、LED ランプにも適用できる色の忠実性に基づいた方法の検討が進んでいる。さらに LED ランプのもつ特徴的な演色効果を評価できる全く新しい評価方法を開発する技術委員会 TC1-91 (New Methods for Evaluating the Colour Quality of White-Light Sources、2012 年新設) では、色の忠実性以外の色の好ましさ、色の目立ち、色彩調和な印象を評価できる演色性評価方法の開発もスタートした。しかし、現状では上記 TC1-90、TC1-91 が目標としている新演色性評価方法においても照度の影響を考慮した方法は提案されていない。すなわち、現行の演色性評価方法を含め上記の演色性評価方法においては照度によって色の見えが変化した場合も演色評価数は常に一定である。

現在、美術館展示用光源は Ra 、 Ri を唯一の指標としており、美術館照明に関する ISO/CIE 規格では Ra 80 以上の光源を用いるべきであると提案している。しかし、高演色ランプの色再現を得るためにはある程度の照度 (1000 lx 以上) が必要であるとの指摘がある。また、厳密な色の判定など表面色の視感比較方法における観察照度は原則として 1000 lx 以上と規定されているため、これまでの演色性評価に関する多くの研究では 1000 lx 近傍 (少なくとも数 100 lx 以上) に設定されていることが多い。1000 lx 近傍、少なくとも明所視を前提に定義された Ra や Ri が低照度下においても色の見えを正しく表しているのか、美術館照明にとって演色性とはどう在るべきなのか、検討すべき事項は多い。最適な美術館照明及び照明色彩・視環境を実現するには、LED ランプを含む異なる光源及び広範囲な照度下での色の見えを考慮した新しい演色性評価方法の開発が必要不可欠であると考えらる。

本研究の目的は、LED ランプを含む各種光源及び様々な照度下での色彩印象を定量化し、美術館照明を評価する新しい演色性評価方法を確立することである。そこで、まず LED ランプを含む各種光源及び広範囲な照度下で物体色の見えがどのように変化する、評価されているのかを明らかにする。さらに、色の見えの評価に基づく新しい演色性評価方法を確立し、

その方法に基づいて低照度下の美術鑑賞における最適な光源の分光分布を決定する。

目 次

論文要旨	i
目 次	iv
第1章 序論	- 2 -
1.1 はじめに	- 2 -
1.2 美術館照明の課題	- 4 -
1.2.1 美術館の照明規制	- 4 -
1.2.2 美術館照明の歴史	- 9 -
1.2.3 美術館照明の演色性評価の問題点	- 11 -
1.3 研究目的	- 14 -
1.4 本論文の構成	- 17 -
第2章 本研究に関わる諸研究	- 22 -
2.1 照度、輝度と物体色に関する研究	- 22 -
2.1.1 照度及び輝度が物体色の見えに及ぼす影響	- 22 -
2.1.2 照度及び輝度が印象評価に及ぼす影響	- 23 -
2.2 演色性評価方法に関する研究	- 24 -
2.2.1 色の忠実性に基づく演色性評価	- 25 -
2.2.2 好ましさに基づく演色性評価方法	- 28 -
2.2.3 色域面積比、目立ち感に基づく演色性評価方法	- 30 -
2.2.4 記憶色に基づく演色性評価方法	- 31 -
2.3 最適な美術館照明に関する研究	- 33 -
2.3.1 照度に関する美術館照明の研究	- 33 -
2.3.2 CCT に関する美術館照明の研究	- 34 -
2.3.4 演色性及び分光分布に関する美術館照明の研究	- 35 -
2.4 結論	- 37 -
第3章 美術館照明の実態調査	- 40 -
3.1 はじめに	- 40 -
3.2 実態調査	- 40 -
3.2.1 東北地方	- 41 -
3.2.2 関西地方	- 41 -
3.2.3 九州地方	- 42 -

3.2.4 中国地方	42 -
3.3 結論	47 -
第4章 CIE/JIS の色の忠実性評価方法と照度の関係	50 -
4.1 はじめに	50 -
4.2 分光分布及び照度が異なる場合の色の見えの測色解析	50 -
4.2.1 解析方法	51 -
4.2.2 解析結果	55 -
4.3 低照度下の色の見えの主観評価	58 -
4.3.1 実験	58 -
4.3.2 結果及び考察	62 -
4.4 結論	67 -
第5章 分光分布及び照度が異なる照明下における色彩印象評価	70 -
5.1 はじめに	70 -
5.2 2色配色に対する色彩印象評価	71 -
5.2.1 実験	72 -
5.2.2 結果及び考察	79 -
5.3 結論	90 -
第6章 「色質」に基づいた演色性の新しい考え方	92 -
6.1 はじめに	92 -
6.2 美術館照明における演色性の考え方	92 -
6.2.1 美術館照明を評価する新しい評価尺度	92 -
6.2.2 「色質」の仮説	93 -
6.3 多色配色に対する色彩印象評価	95 -
6.3.1 多色配色 (mosaic) の作成	95 -
6.3.2 実験	106 -
6.3.3 結果及び考察	110 -
6.4 「色質」の定義	128 -
6.5 結論	128 -
第7章 「色質」の主観評価に対する観察対象物の影響	132 -
7.1 はじめに	132 -
7.2 実験1 (観察対象物に含まれる色相の影響)	133 -

7.2.1 はじめに.....	133 -
7.2.2 実験.....	135 -
7.2.3 結果及び考察.....	142 -
7.2.4 結論.....	154 -
7.3 実験 2（観察対象物の赤色の有無の影響）.....	155 -
7.3.1 はじめに.....	155 -
7.3.2 実験.....	155 -
7.3.3 結果及び考察.....	160 -
7.3.4 結論.....	170 -
7.4 実験 3（観察対象物に含まれる赤色の面積の影響）.....	172 -
7.4.1 はじめに.....	172 -
7.4.2 実験.....	172 -
7.4.3 結果及び考察.....	174 -
7.4.4 結論.....	181 -
7.6 結論.....	181 -
第 8 章 照度効果を取り入れた新しい演色性評価方法の開発.....	184 -
8.1 はじめに.....	184 -
8.2 色質評価数 R_{xi} 、 G_x	184 -
8.2.1 カラフルネス値の計算.....	185 -
8.2.2 試験色.....	185 -
8.2.3 基準光源.....	189 -
8.3 個々の試験色に対する色質評価数（ R_{xi} ）.....	189 -
8.4 R_{xi} と主観評価値との関係.....	191 -
8.5 試験色全体の色質評価数（ G_x ）.....	192 -
8.6 G_x と主観評価値との関係.....	195 -
8.8 結論.....	196 -
第 9 章 色質評価数 G_x 最適化による分光分布設計.....	198 -
9.1 はじめに.....	198 -
9.2 色質評価数 G_x に基づく分光分布の最適化.....	199 -
9.2.1 低照度下の色再現目標.....	199 -
9.2.2 低照度下で G_x を最大とする分光分布設計.....	200 -

9.3 最大 G_x を有する光源下の色彩印象評価	- 210 -
9.3.1 実験	- 210 -
9.3.2 結果及び考察	- 218 -
9.4 分光分布の違いによる光学的損傷係数の比較	- 228 -
9.5 結論	- 231 -
第10章 総括	- 234 -
参考文献	- 237 -
業績	- 253 -
謝辞	- 255 -

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 はじめに

わが国では1951年に博物館法（昭和26年12月1日、法律第285号）が制定され、博物館は博物館法第2条において“歴史、芸術、民俗、産業、自然科学等に関する資料を収集し、保管（育成を含む。以下同じ。）し、展示して教育的配慮の下に一般公衆の利用に供し、その教養、調査研究、レクリエーション等に資するために必要な事業を行い、あわせてこれらの資料に関する調査研究をすることを目的とする機関・・・中略・・・による登録を受けたものをいう”と定義されている¹⁾¹⁾。ここで示す博物館とは広義であり、資料を収集、保管し、調査・研究、展示を行っている施設は公民館及び図書館を除いてすべて博物館に相当する。すなわち、科学博物館、歴史博物館、美術博物館をはじめ、動物園、植物園、水族館も法的には博物館に含まれる。本論文で論じる博物館は主に“美術博物館（以下、美術館）”である。なお美術館において収蔵の対象となる資料は絵画や彫刻、工芸品、書跡、さらには演劇や音楽の分野も対象となるが¹⁾²⁾、本論文では主に絵画を代表とし、これらを一括して以下“美術作品”と称する。

美術館の主たる機能及び目的のひとつに美術作品の展示がある。美術館は、古来受け継がれてきた貴重な美術作品を劣化させることなく一般公衆に公開し、さらなる世代へと引き継いでいく役目を担っている。ここでとりわけて重要な要素として挙げられるのが光（光源）、照明である。

図1-1は美術館照明に要求される主な3要素「展示性」、「保存性」、「経済性」の関係を示している。美術館照明に用いられる光源は、美術作品が自然昼光下で見たときと同様の色に見え、なおかつ美術作品にとって安全であるべきという考え方を基本に選定されてきた。美術作品を自然昼光下で見たときと同様の色に見せるには、一般的に青色、緑色、黄色、赤色などのすべての光色をもつ光源が必要であり、そのためには光源の発光効率を犠牲にせざるを得ない場合が多い。また、美術作品の保存の観点で最も安全な照明環境とは、光の全くない暗黒であるが、美術作品を鑑賞するには当然適切な質と量の光源が必要不可欠である。このように、美術館照明において「展示性」、「保存性」、「経済性」は常にトレード・オフの関係にあり、最適な美術館照明とは上記の3要素をバランスよく両立させた光源であるといえる。

本論文では、主題「美術館における最適な照明・色彩視環境」において、「経済性」については「展示性」、「保存性」を満たすことによって得られるという視点だけに止め、主に「展

示性」と「保存性」について論じる。

「展示性」、すなわち美術作品を見せるためには、適切な量と質の光源が必要である。美術館照明に要求されるのは、照明することによって美術作品が有する色彩、質感を美しく見せ、あるいは制作者や展示主催者が意図した色彩、質感を適切に再現することである。美術作品の色や質感の見えに影響を及ぼす光源の要因は様々あり、分光分布の形状、色温度、演色性、照度、照射角度、配光などが挙げられる。

「保存性」、すなわち美術作品の保存にとって最も理想的な環境は光の全くない闇である。光源による美術作品の損傷の主な原因には、光化学作用と熱化学作用があり、光化学作用とは、光子の吸収から引き出される変化のための活性化エネルギーのことで^{1・3)}、美術作品の色を変化させ、支持体^{注1・1)}の強度低下を生じさせる。熱化学作用とは、光放射による美術作品の表面温度の加熱によって生じる化学作用で、支持体及び色材の乾燥を促進し、変質・変形を引き起こすことが知られている。光化学作用と熱化学作用を生じさせないためには、光源の紫外域及び赤外域を適切に取り除かなければならない。また可視放射であっても約 580 nm 以下の波長は損傷の原因となるため^{1・4)}、光源の分光分布については十分に留意し、光放射の量を最低限に抑えることが望ましい。美術作品が時間の経過と共に変化、変質するのは当然のことであり、その変化を遅らせることはできても完全に食い止めることはできない。従って、美術館にとっての保存とは、影響し得る全ての要素から美術作品を保護し、変化、変質の速度を遅らせることである。

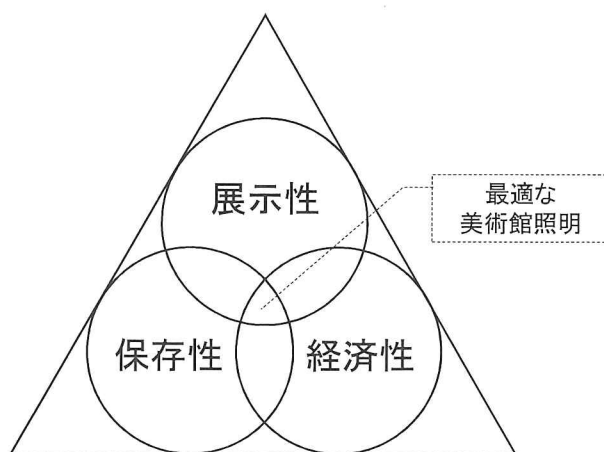


図 1-1 美術館照明に要求される 3 要素

注 1・1) 支持体：絵画の基盤となる材料を指し、油彩画では板やキャンバス、日本画では和紙や絹などがこれに相当する。

1.2 美術館照明の課題

1.2.1 美術館の照明規制

美術館では、光放射による美術作品の光化学的損傷を抑制するために、照明（照度（lx、ルクス）、相関色温度（K、ケルビン）、演色評価数（平均演色評価数 R_a 、特殊演色評価数 R_i ））が厳しく制限されている。表 1-1 に CIE（国際照明委員会）の技術報告書 No.157（光放射による展示物の損傷の抑制）で提案されている照度分類¹⁻³⁾、¹⁻⁵⁾を示す。表 1-2 は各国及び各機関の美術館照明における推奨値¹⁻⁶⁾であり、表 1-3 は JIS (Z 9110-1791)¹⁻⁷⁾における美術館、博物館の照明設計基準（維持照度（ $\bar{E}_m$ 、lx）及び平均演色評価数 R_a ）であり、表 1-4 は東京国立博物館における照明の推奨値である¹⁻⁸⁾。

表 1-1 から表 1-4 に示すように、照度の推奨値は各国及び各機関によって大きく異なっている。わが国では、文化庁の基準¹⁻⁹⁾を参照して展示期間が決定される。これによれば、年間の公開回数は原則 2 回以内、公開日数は延べ 60 以内とされ、褪色のおそれや劣化の程度が高いものについては、年間公開日数の限度を延べ 30 日以内にすること、とある。照度は年間の積算量（表 1-1 では限界露光量、表 1-3 では最大積算照度で示す）で管理されるため、その範囲内での照射時間の自由度を与える¹⁻⁸⁾。すなわち、推奨値よりも低い照度に設定すれば展示期間を延ばすことができるが、推奨値よりも高い照度に設定すれば展示期間を短縮しなければならない。さらに、照度の推奨値は美術作品の耐光性によって細分化されており、耐光性の低い美術作品にはより厳しい照度規制が設けられている。ディステンパー画

（Distemper：漆、以下、日本画とする）の多くは和紙や絹を支持体としており、耐光性に乏しい。従って、日本画の推奨照度値はどの規格においても低く、おおよそ 50 lx～150 lx 以下である。

光源の色温度（光色）と損傷の関係については、図 1-2¹⁻³⁾、¹⁻⁵⁾に示すように「相対的な損傷の可能性は、色温度の上昇に伴って上昇する¹⁻³⁾」ことが知られている。表 1-2 にも示すように、国際博物館協会（The International Council of Museums：ICOM）では、耐光性の強い美術作品には高色温度の光源、耐光性の弱い美術作品には低色温度の光源を推奨している。

以上のように、美術館では特に美術作品の保存性を重視して照明の推奨値が決定されるが、推奨されている展示照明環境が制作時の照明環境、及び鑑賞者にとって好ましい照明環境と一致しているとは考え難い。照度が色の見えに与える影響は大きく、照度（輝度）が低下すると有彩色の色も変化し、一般的に見かけの明るさや鮮やかさが低下することが知られている¹⁻¹⁰⁾。また、照明空間の快適さについては照度と光源の光色との関係が検討されており、

高色温度では高照度に、低色温度では低照度にすることによって快適さが得られるとの報告がある¹⁻¹¹⁾。以上のように展示照明は保存性を重視して管理されることが多いが、このような照明環境が鑑賞の立場において本当に望ましい照明環境といえるのか、議論すべき点は多い。

19世紀後半に人工照明が発明される以前、人々は長らく燃焼光の照明の下で生活を送っていた。太陽が沈み自然日光が得られなくなった時間帯や屋内では、自然日光以外の燃焼光、すなわち松明（たいまつ）や蝋（ろう）などの炎による照明に頼らざるを得なかった。ろうそく1本の照度はおおよそ1 lxであり（旧単位1燭光、ろうそく1 m距離の照度は約1 lx）、現在の照明環境に比べると非常に薄暗い。制作がこのような薄明かりの下で行われていたのであれば、薄明かりの下で鑑賞するのが制作者の意図に沿うとも考えられる。図1-3（a）は人工照明が発達する以前のわが国における絵の制作風景の一例である。この風景からは、当時の画家や絵師たちが障子や窓を大きく開け日光を取り入れた照明環境で制作を行っていたことがうかがえる。図1-3（b）は17世紀から19世紀における西欧の絵の制作環境及び制作風景の一例¹⁻¹²⁾である。西欧においても多くのアトリエでは自然日光を取り入れており、さらに印象派以降は戸外での制作も行われるようになった。

以上のことから、現在美術館に展示されている美術作品の多くは、自然日光が採光された明るい照明環境下で制作されたと考えられる。すなわち、制作時の照明環境は、照度を制限し、人工照明で照明された現在の美術館展示室の照明環境とは異なる。特に日本画など展示室の照度を低く設定し、低色温度で照明する場合、美術作品の色は“制作時の照明環境”の色よりも赤っぽく、暗くくすみ、これに伴って色から受ける印象も変化していることが推測される。

表 1-1 分光応答度分類における制限照度、年間限界露光量（CIE 157-2004）¹⁻³⁾、¹⁻⁵⁾

材料分類	例	制限照度[lx]	限界露光量[lx・h/y]
1.応答度なし	ほとんどの金属、石、ほとんどのガラス、純粋な陶磁器、瑠璃、ほとんどの鉱物。	無制限	無制限
2.低応答度	油彩画やテンペラ画、フレスコ画、染めていない皮革や木、角、骨、象牙、ラッカー、幾つかのプラスチック。	200	600,000
3.中応答度	衣装、水彩画、パステル画、タペストリー、印刷物や素描、原稿、模型、ディステンパー画（にかわによる絵）、壁紙、グワッシュ画（不透明水彩画）、染めた皮革、植物標本や毛皮や羽毛を含むほとんどの歴史的天然物。	50	150,000
4.高応答度	絹、非常に変質しやすいと知られている色素、新聞。	50	15,000

表 1-2 各国、各機関における制限照度¹⁻⁶⁾

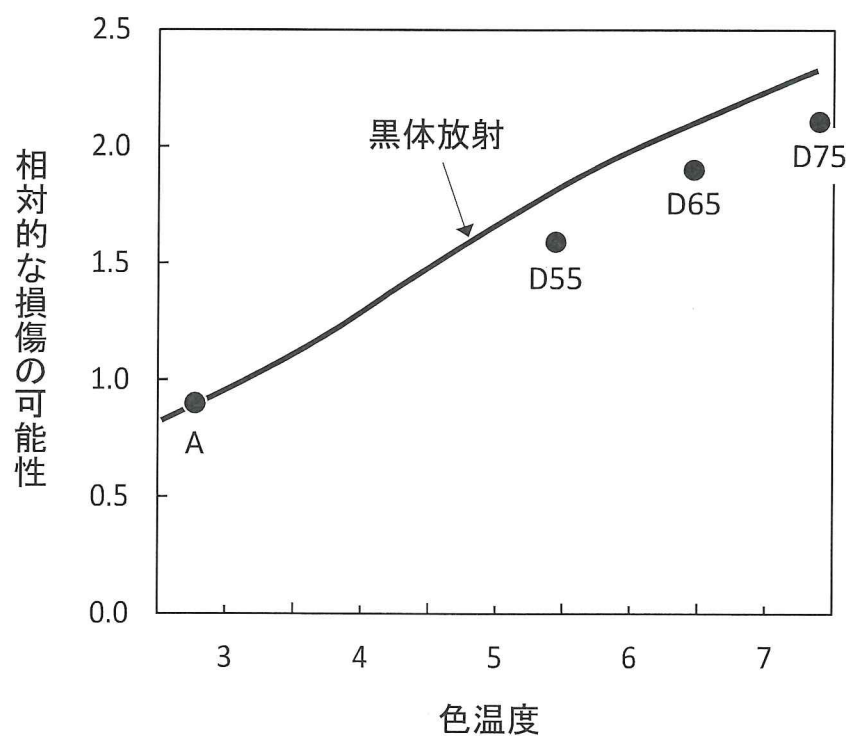
材料分類	例	日本(文化庁) 文化財保護要覧(1970)	日本 JIS Z9110 (1979)	日本 照明学会 (1999)	イギリス CIBSE (1970)	アメリカ IESNA (1993)	国際博物館協会 ICOM (1977)
それほど 敏感ではない	金属、石、ガラス、陶磁器、宝石、 珪礫、エナメル、ステンドグラス。		700-1500 lx	500 lx		展示の方法、 状況による。	特に制限なし。 ただし300 lxを超える必要は ほとんどなし。 (相関色温度: 約4000-6500K)
比較的敏感	油絵、テンペラ画、フレスコ画、 皮革、骨、角、象牙、木製品、漆器。	150 lx以下	300-750 lx	150 lx (年間積算照度:360000 lx・h以下、 1日8時間、年間300日点灯で 150×8×300=360000)	150 lx	220 lx (年間露光量: 500000 lx・h、 最大:300日)	150-180 lx (相関色温度: 約4000K)
非常に敏感	染色物、衣装、タペストリー、 手写本、水彩画、日本画、切手、 壁画、印刷物、染色した皮製品、 自然史関係標本。	150 lx以下 (特に脆弱なものは、年間 照射日数: 30日以内)	150-300 lx (剥製品、標本に ついては75-150 lx)	50 lx (年間積算照度: 120000 lx・h以下、 1日8時間、年間300日点灯で 50×8×300=120000)	50 lx	54 lx (年間露光量: 54000 lx・h、 最大:125日)	50 lx (できれば低い方がよい) (相関色温度: 約2900K)

表 1-3 JIS (Z 9110-2010) における美術館、博物館の照明基準¹⁻⁷⁾

領域、又は活動の種類	E_m (lx)	Ra
入口ホール	100	60
ラウンジ	200	80
彫刻(石、金属)	1000	90
造形物	1000	90
模型	1000	90
彫刻(プラスタ、木、紙)	500	90
洋画	500	90
絵画(ガラスカバー付)	200	90
日本画	200	90
工芸品	200	90
一般陳列品	200	80
はくせい品	100	90
標本	100	90
映像	20	80
光利用展示部	20	80
ギャラリー全般	100	80
ホール	500	60
小集会室	500	80
教室	300	80
売店	300	80
食堂	300	80
喫茶室	100	80
研究室	750	80
調査室	750	80
収納庫、収蔵庫	100	60
洗面所	200	80
便所	200	80
廊下	100	40
階段	150	40

表 1-4 東京国立博物館における推奨照度値¹⁻⁸⁾

作品分野	最大照度	年間当りの展示期間	最大積算照度
浮世絵版画	50 lx	4週間以内	10,800 lx・hr
染織	80 lx	8週間以内	34,560 lx・hr
水墨、水彩を含む絵画	100 lx	4週間以内	21,600 lx・hr
図譜、地図	100 lx	4週間以内	21,600 lx・hr
書跡、古文書	100 lx	8週間以内	43,200 lx・hr
彩色彫刻	100 lx	3ヶ月以内	64,800 lx・hr

図 1-2 黒体、標準の光 A、D65、補助標準の光 D55、D75 の相対的な損傷の可能性^{1-3)、1-5)}



(a) 左：「帰絵（ぼきえ）巻5（部分）」京都・西本願寺蔵、右：三代歌川豊国『今様見立士農工商』より「職人」

左：http://www.tnm.jp/modules/r_free_page/index.php?id=1404

右：<http://hanga-museum.jp/exhibition/schedule/2014-200>



(b) 左：レンブラントのアトリエ、中：モネの制作風景、右：セザンヌのアトリエ¹⁻¹²⁾

図 1-3 制作環境

1.2.2 美術館照明の歴史

照明光源の歴史を紐解けば、その起源は「火」である。人々は 18 世紀まで自然日光、松明、ろうそく、灯油ランプなど「火」から「あかり」を授かっていた。人工照明（電気エネルギーによる照明）がはじめて登場したのは 19 世紀末であり、人類の歴史を考えると人工照明の歴史は僅か 200 年と極めて短い。

「ミュージアム：museum」の起源は 4 世紀古代ギリシアにあり、現代の博物館の様相ができあがったのは 1683 に英国オックスフォード大学に開設された「アシュモール氏のミュージアム」と言われている¹⁻²⁾。従って、美術館においても自然日光による照明の時代が長く続いたと考えられる。自然日光を美術館照明に用いる歴史は人工光源が普及した現在においても継承され、自然日光を採光している美術館は特に国外に多く存在する。美術館照明に要求されるのは自然日光と同等の特性をもつ光源であり、ハロゲンランプや自然日光と同等の演色性を有する高演色形の美術館用蛍光ランプが主流として用いられてきた。

ハロゲンランプとは、白熱電球の一種でありフィラメントを電流で高温に燃焼して光を得る光源である。ハロゲンランプは、ろうそくや灯油ランプなどと同様の燃焼光であり、色温度の低い自然日光と近い分光分布を有する。演色評価数が高く、白熱電球に比べて高効率であり、さらに光源が小形で配光制御が容易であることから美術館照明として利用されてきた。

蛍光ランプとは、電極に高い電圧をかけることによって気体放電をおこし、管内部に微量に存在する水銀をエネルギー励起することで発生する紫外線によってガラス管内部に塗布した蛍光体を発光させる光源、すなわち放電ランプである。蛍光ランプは、蛍光体の組み合わせによって様々な分光分布を生成することができる。美術館で用いられる蛍光ランプの多くは、色の見えを自然日光に近似させた色再現性の良い美術館専用の蛍光ランプである。

近年、品質向上により LED ランプの応用分野は急速に広がっており、色の見えを重視する美術館にも高演色形 LED ランプの利用が始まっている。LED ランプは、美術作品の損傷、変褪色の原因となる紫外線及び赤外線をほとんど含まないことから、美術館の新しい照明として期待が寄せられているが、半導体による固体発光であり、ハロゲンランプや蛍光ランプのような従来光源と発光原理、分光分布が異なることから、照明された美術作品の色の見え方が変化する可能性や退色を含む損傷の程度がわからないなどの問題が生じる。美術館照明として LED ランプを安全に利用するために、国内外とわず美術館照明としての LED ランプのあり方が活発に研究されており、LED ランプの分光分布と色の見えの関係¹⁻¹³⁾～¹⁻²³⁾や LED ランプの分光分布と美術作品の損傷の関係¹⁻²⁴⁾～¹⁻²⁶⁾などが報告されている。

図 1-4 に主要な光源の分光分布を示す。図 1-4 (a) は電球の分光分布であり、短波長域の

発光エネルギーが小さく、長波長域に向かって発光エネルギーが大きくなっていくのが特徴である。図 1-4 (b) は美術館用蛍光ランプの分光分布であり、水銀放電による可視輝線及び蛍光体発光の急峻な分光分布が特徴である。LED ランプの発光方式は主に 3 通りあり、①青色 LED を励起光とし黄色蛍光体を発光させて白色に混光するタイプ、②紫色 LED ないし紫外 LED を励起光に赤色、緑色、青色蛍光体を発光させて白色に混光するタイプ、③赤色・緑色・青色 LED を組み合わせて白色に混光するタイプである。①及び②の方式は比較的広帯域な分光分布を有し、③の方式は狭帯域の分光分布を有する。図 1-4 (c) は青色 LED を励起光とし黄色蛍光体を発光させて白色に混光するタイプの分光分布であり、図 1-4 (d) は赤色・緑色・青色 LED を組み合わせて白色に混光するタイプの分光分布である。

これまで電球や蛍光ランプによる照明が主流であった美術館に LED ランプが導入されはじめた昨今、その演色性及び美術作品の光化学的損傷の可能性については十分に検討し、留意する必要がある。

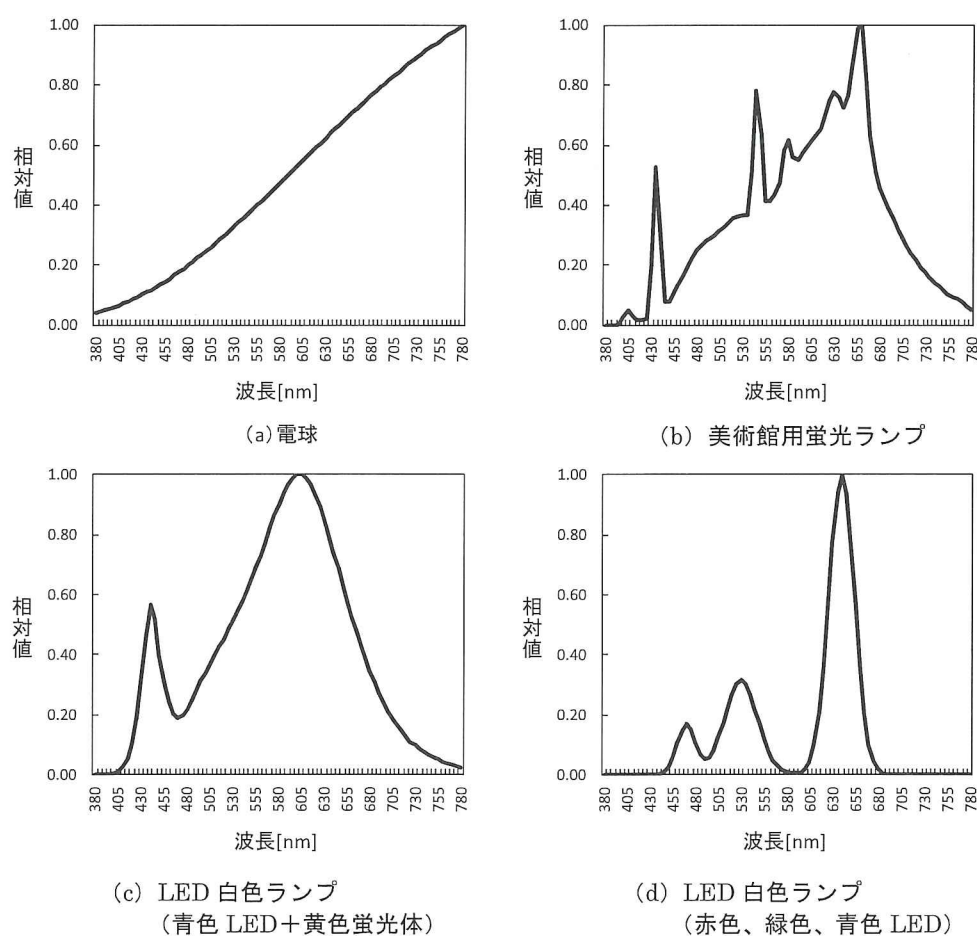


図 1-4 各種光源の分光分布

1.2.3 美術館照明の演色性評価の問題点

「デパートでは鮮やかなピンクに見えたドレスが自宅では暗く、くすんで見える」、「スーパーマーケットに並んでいる生鮮食品が色鮮やかで美味しそうに見える」など、環境の違いによって物体の色の見え方や印象が変化したと感ずることは少なくない。この環境の違いによって生ずる色のずれや見かけ上の明るさ、鮮やかさの変化は、光源の違いに因るところが大きい。

図 1-5 に視知覚の影響要因とプロセスを示す。我々が物体の色を見る（知覚する）ということは、光源の光が物体に入射し、その物体の反射特性によって決まる反射成分の一部が眼に入射し、視覚系の複雑な処理を経て、脳の中で知覚、認識されるというプロセスを経なければならない。このとき、光源によって眼に入射する物体の反射成分が異なること及び眼の順応特性によって物体色の色のずれや見かけ上の明るさ、鮮やかさの変化が生じる。

この光源が物体の色の見えに影響を及ぼす効果を演色（color rendition）といい、この効果を光源の特性と考えたときに演色性（color rendering properties）という。また、光源の演色性の良し悪しを数値化して評価する方法を演色性評価方法といい、演色性評価方法から計算される数値を演色評価数という。現在、CIE/JIS（日本工業規格）で規定されている光源の演色性評価方法 JIS Z 8726-1990（光源の演色性評価方法）¹⁻²⁷⁾ は色の忠実性に基づく方法である。この方法は特定の試験色を試料光源、基準光で照明したときに両者の色が測色的にどれだけずれているかを相対的に数値化したものであり、それらは平均演色評価数 R_a 、特殊演色評価数 R_i によって表される。 R_a 、 R_i は定義上、測色的なずれ（色差）を表したものであり、色の自然らしさ、色の好ましきなど色彩の主観的な印象を評価したものではない。

蛍光灯が普及する以前は白熱電球が用いられていたため、演色性が問題にされることがなかった。「演色性」という用語が生まれた背景には 20 世紀初頭中頃から普及が始まった蛍光灯の出現が深く関わっている¹⁻²⁸⁾。

蛍光灯は 1938 年米国 GE 社の Inman らによって実用化され、わが国では 1940 年に法隆寺金堂の壁画を模写するという紀元 2600 年の記念事業のために昼光色ランプが実用された。驚くことに、法隆寺壁画模写に使用されたこの蛍光灯は R_a 94 という性能を持ち、今日の高演色ランプに引けをとらない。しかし、演色性を重視した蛍光灯は発光効率が悪く、実用としては不向きである。そこで、高効率で優れた安定性をもつ蛍光灯が開発されるに至った。これによって白熱ランプ、高い演色性をもつ蛍光灯、低い演色性をもつ蛍光灯が市場に混在することになり、これらのランプの演色性の違いを評価するために、CIE が舵を取る形で演色性評価に関する研究が盛んに行われることになった。

蛍光ランプの商品化から約 60 年後の 1996 年、白色 LED ランプの実用化がはじまった。LED ランプの登場により、CIE では演色性評価方法がもつ様々な問題点を改良した新しい演色性評価方法を開発するため、2012 年 9 月に CIE-TC1-90 (Colour Fidelity Index) を設置し、LED ランプにも適用可能な色の忠実性に基づいた方法の研究が進んでいる。さらに LED ランプのもつ特徴的な演色効果を評価できる全く新しい評価方法を開発する技術委員会 TC1-91 (New Methods for Evaluating the Colour Quality of White-Light Sources) が 2012 年 9 月に新設され、色の忠実性以外の色の好ましさ、色の目立ち、色彩調和など色彩印象を評価できる演色性評価方法の開発もスタートした。しかし、現状では上記 TC1-90、TC1-91 が目標としている新しい演色性評価方法においても照度による色見えの変化（以下照度効果）を考慮した方法は検討に含まれていない。

照度が変化した場合の色見えの変化は経験的によく知られているにもかかわらず、未だに照度の違いを考慮した（以下、照度効果とする）演色性評価方法が確立されていない背景には、以下の理由が考えられる。演色性評価方法に照度効果を導入するには、照度による色見えの変化を数値で表す必要がある。現在、照度効果を含む視環境の変化による色見えを推定する色見えモデル (Color appearance model) が CIE によって規格化されているが、色見えモデル自身が複雑な構造を有しているため、これを用いることによって演色性評価方法の構造も複雑を極める。日常的生活視環境である住宅照明やオフィス照明では、多くの場合 50 lx 以下のような低照度を設定することがなく、従って照度と演色性の問題について議論する必要がなかった。すなわち、一般照明の分野においては、評価構造を複雑にするという代償を負ってまで照度効果を考慮した演色性評価方法の開発が要求されなかったのである。

現在、多くの美術館では Ra 、 Ri を唯一の指標として光源を選定しており、一般的に美術作品を照明する光源（展示用光源）については、JIS Z 9112 : 2012（蛍光ランプ・LED の光原色及び演色性による区分）¹⁻²⁹⁾ における演色 AAA 規格、すなわち電球色の場合 Ra 90 以上、 Ri も最低値が決められている高演色ランプを用いるべきであると言われている。JIS Z 9110 : 2010（照明基準総則）¹⁻⁷⁾ では、表 1-3 にも示すように Ra 90 以上の光源を用いることを推奨している。美術館の展示環境について詳細に記された Thomson の書籍¹⁻³⁰⁾ では、展示用光源に演色性の良い Ra 90 以上の光源を用いることを推奨している。美術館の展示照明について書かれた藤原の書籍¹⁻³¹⁾ においても、展示用光源は Ra 95 以上、かつ Ri 90 以上が望ましいとある。

しかし、 Ra 値、 Ri 値が高い高演色ランプの色再現性能を得るためには、ある程度の照度

(1,000 lx 以上) が必要であるとの指摘がある¹⁻³²⁾。また、厳密な色の判定など JIS Z 8723 : 2000 (表面色の視感比較方法)¹⁻³³⁾ における観察照度は原則として 1,000 lx 以上と規定されている。従って、これまでの演色性評価に関する多くの研究では、照度が 1,000 lx 近傍 (少なくとも数 100 lx 以上) に設定されていることが多い¹⁻³⁴⁾。1,000 lx 近傍、少なくとも明所視を前提に定義された Ra や Ri が低照度下においても色の見えを正しく表しているのか、美術館照明にとって演色性とはどう在るべきなのか、検討すべき事項は多い。

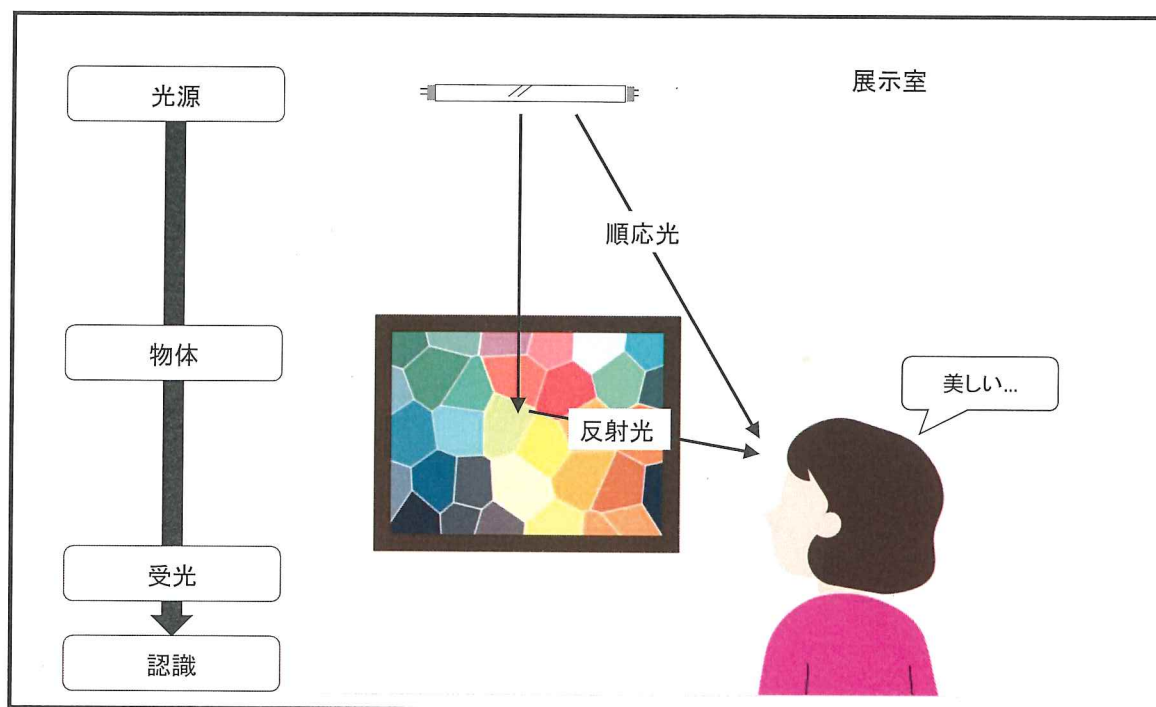


図 1-5 視知覚の影響要因とプロセス

1.3 研究目的

前節に示したように、美術作品は自然昼光を取り入れた明るい照明環境で制作されていたのに対し、現在の美術館、特に日本の美術館では自然光を全て遮断し人工照明を用いた展示が主であり、厳しい照明規制の下での鑑賞が余儀なくされている。従って、美術作品が展示されている多くの展示室では“制作時の照明環境”と“鑑賞時の照明環境”に不一致が生じている。“制作時の照明環境”と“鑑賞時の照明環境”が異なる中で美術館にとって最適な照明・色彩視環境とはどのようなものであるか、この美術館照明のあり方については議論を要する。

また、これまで美術館照明は色の忠実性に基づき Ra によってその良し悪しが評価されてきたが、美術館照明の演色性評価において色の忠実性、色の好ましさ、色の自然らしさなど何が重要なのか、また光源による美術作品の色再現目標において作者の意図、学芸員の意図、測色的色再現など何を目標にすべきなのか、これらの課題についても明確にする必要がある。

照度の変化に伴う色の見えの変化は一般的に生ずる現象であり、 $Hunt^{1-10)}$ をはじめ多くの研究者がそのメカニズムを明らかにしているが、照度効果を考慮した演色性評価方法は提案されておらず、美術館照明の最適化は主に Ra に基づいて行われている。しかし、 Ra と照度の関係を検討した研究は存在せず、 Ra が低照度下の色の見えを評価できるのか否かについては明らかになっていない。さらに、美術館の新しい照明光源として期待されている LED ランプは、その照明下での色の見えと Ra が対応しない場合があり¹⁻³⁴⁾、例えば、同じ Ra を有する LED ランプであっても異なる演色性を有する場合がある¹⁻³⁵⁾ との指摘がある。

本研究の主題である「美術館における最適な照明・色彩視環境」を達成するには、LED ランプを含む様々な光源及び高照度から低照度に至る広範囲な照度下での色の見えを考慮した新しい演色性評価方法を開発する必要がある。図 1-6 に美術館照明用の演色性評価方法に関わる主な影響要因を示す。影響要因は、(1) 光、(2) 評価方法、(3) 観察対象物に大別することができる。

(1) 光とは、美術作品を照明する光のことであり、色の見えは光源の分光分布や照度によって変化し、さらに美術館では厳しい照明規制があることから、本研究において光源の分光分布、照度は特に重要な要素である。

(2) 評価方法とは、色の見えの評価方法であり、見えの評価と印象の評価に大別できる。美術館照明の評価において、見えの評価、印象の評価のどちらがより適切であるのか、どのように定量化できるのか、両者の関係は重要である。見えの評価は色の見えそのものの評価

であり、色の3属性（色相、明度、彩度）、色差、視力などが挙げられる。印象は色から受ける印象の評価であり、色の好ましさ、色の美しさなどが挙げられる。

（3）観察対象物とは、美術作品及び美術作品の周囲を指し、分光特性、質感、カテゴリー（絵画、彫刻など）、大きさなどが挙げられ、光との関係が重要である。

本研究の目的を以下に整理する。

1. LED ランプを含む各種光源及び広範囲な照度下で、有彩物体の色の見え及び色彩印象がどのように変化するのかを測色的解析及び主観評価実験によって明らかにする。
2. LED ランプを含む各種光源及び高照度から低照度に至る広範囲な照度下で、有彩物体の色の見え及び色彩印象がどのような評価尺度で定量化できるのかを明らかにする。
3. 1、2 の結果から照度効果を考慮した主観的な色の見えに基づく新しい演色性評価方法を確立し、この方法に基づいて低照度下の美術鑑賞における最適な光源の分光分布を決定する。

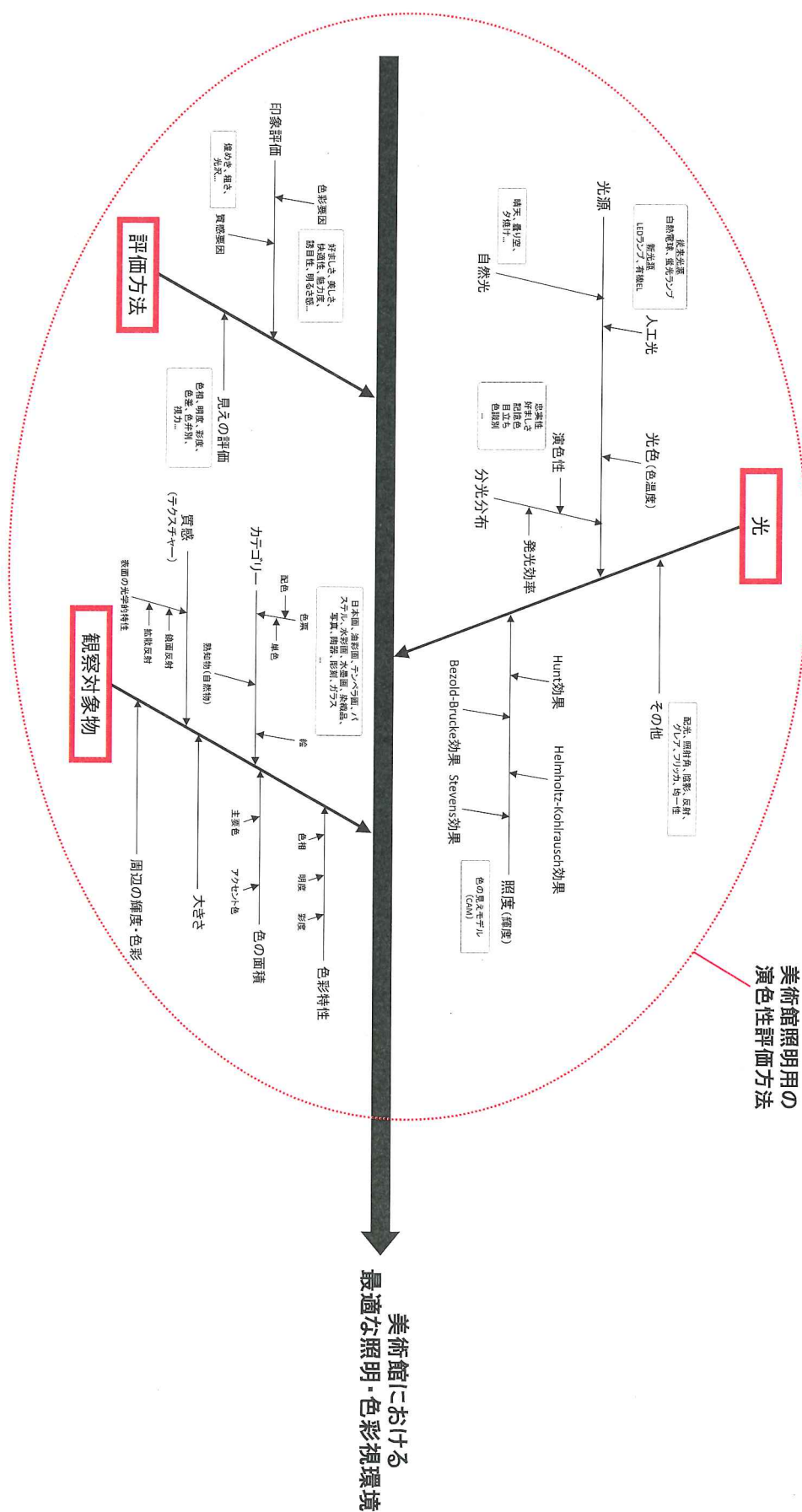


図 1-6 美術館照明用の演色性評価方法に関わる主な影響要因

1.4 本論文の構成

本論文は第1章から第10章、及び参考文献、謝辞で構成されている。本論文の展開及び流れを図1-7に示す。

第1章は、美術館の照明・色彩視環境における問題、課題を整理し、本研究に至る背景及び目的、意義を明示する。

第2章は、演色性及び照度と色の見えに関する諸研究、さらに最適な美術館照明に関する諸研究を概観し、本研究の位置づけ、及び目的を明確にする。

第3章は、美術館照明の現状を把握するために実施した国内美術館を主とする照明環境の実態調査結果を述べ、美術館照明の問題、課題を提起する。

第4章は、現行 CIE/JIS 演色性評価数 R_a 、 R_i が低照度下の色の見えを表しているのかを検証するために、照度が変化したときの色の見えの変化を測色計算評価及び主観評価実験により明らかにする。

第5章は、2色配色の色彩印象に対する分光分布及び照度の影響を SD 法 (semantic differential technique) によって評価し、美術館照明の演色性評価として“色彩印象の評価方法”が有効であるか否かを検討する。

第6章は、忠実性評価に代わる演色性評価である色彩印象評価の評価概念を検討するために、異なる照明下における色彩印象の評価構造を明らかにする。その評価構造に基づき美術館照明を評価する新しい評価尺度「色質」を定義する。

第7章は、「色質」が光源の分光分布、照度、観察対象物の色彩特性（色相、鮮やかさ、色の面積）によって変化すると仮定し、主観評価実験によって検証する。これらを考慮した「色質」に基づく新しい演色性評価方法が必要であることを明らかにする。

第8章は、第6章及び第7章の結果に基づき、新しい演色性評価方法として試験色全体の色質評価数 G_x 、個々の試験色の色質評価数 R_{xi} を提案する。

第1章 序論

第9章は、第8章で示した色質評価数 G_x に基づいて低照度下の美術鑑賞に最適な光源の分光分布を理論計算により求め、その分光分布に近似した実際の光源下の色彩印象を主観評価により検証する。

第10章は、第1章から第9章までを総括し、今後の課題を述べる。

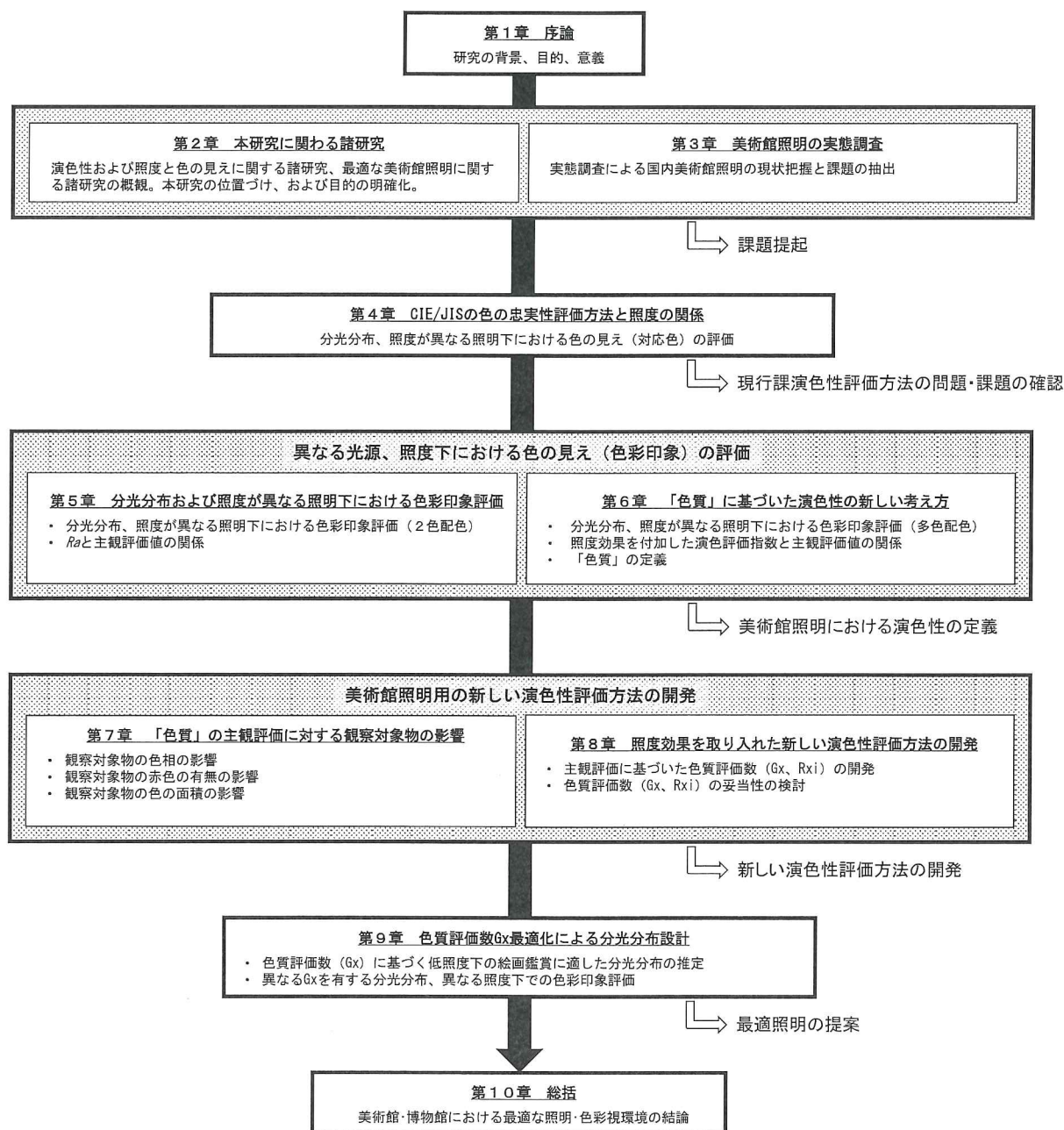


図 1-7 本論文の展開および流れ

第 2 章

本研究に関わる諸研究

第2章 本研究に関わる諸研究

2.1 照度、輝度と物体色の関係に関する研究

照度や輝度の測光量の違いは有彩色物体の色の見えに影響し、照度・輝度が低下することによって知覚的な明るさ、鮮やかさは低下し^{2-1)~2-9)}、それに伴って色弁別^{2-10)~2-12)}、色の同定²⁻¹³⁾や分類の正答率²⁻¹⁴⁾、作業効率²⁻¹⁵⁾、印象評価^{2-16)~2-20)}などが低下する。さらに照度の違いによる色の見えや印象評価の変化は光源の演色性²⁻²¹⁾及び相関色温度²⁻²²⁾の影響を受ける。本研究では、照度・輝度の変化による色の見えの変化に関する既往研究、及び色の見えの変化に伴う印象評価の変化についての既往研究を以下に整理する。

2.1.1 照度及び輝度が物体色の見えに及ぼす影響

有彩色の明るさ、鮮やかさは照度・輝度の増減によって変動する^{2-1)~2-9)}。この照度や輝度の変化によって有彩色物体の色の見えが変化する現象を、**Hunt** による代表的な研究^{2-1)~2-2)} から **Hunt** 効果と呼ぶ。

Hunt は照度の変化による色の見えの変化を、両眼隔壁法を用いた実験により検証した^{2-1)~2-2)}。両眼隔壁法は左眼と右眼で異なる照明条件に順応したとき、それぞれの眼の順応状態が他方の眼に影響しないという前提のもとに、中央を隔壁で遮断した2つの実験ブースなどを用いて左右の眼に異なる照明条件を与える実験手法である²⁻³⁾。両眼隔壁法は2つの実験ブースの照明条件をそれぞれ独立して変化させることによって、左右の見えの差異を相対的に評価できる。**Hunt** はテスト視野の順応輝度（照度）を日常で経験する 16,900 lx から 1.2 lx まで6段階に変化させ、テスト視野の刺激を参照視野の刺激に等色した結果、日常的な照度レベルにおいても照度が低下することによって鮮やかさが低下することを明らかにした。

さらに、**Hunt** は色の鮮やかさが照明環境に依存することに言及し、照度のレベルによって変化する見かけの色の变化をカラフルネス (colorfulness) という言葉で示した。カラフルネスはクロマとは異なり、たとえば C^* 100 (メトリッククロマ: CLELAB のクロマに近似的に相関する量) の色票があったとき、1,000 lx では非常にカラフルネスが高く見えるが、10 lx では中程度のカラフルネスになり、さらに照度が低下し 0.1 lx 以下になるとカラフルネスはほぼ失われる。すなわち照明によって変化しない物体自身の色みをクロマとしたとき、照明の影響を受けて変化する色みをカラフルネスと解釈することができる²⁻³⁾。

Shin ら²⁻⁴⁾は、明所視から暗所視に至るまでの異なる照度レベル下における色の变化を調べるために、両眼隔壁法による等色実験を行った。被験者は、テスト側で観察する色票と同

じ色の見えになるように、基準側に置かれた CRT のディスプレイ上で色を調整した。なお、照度はテスト側のみ 1000 lx、100 lx、10 lx、1 lx、0.1 lx、0.01 lx の 6 段階に変化させている。実験の結果、ほとんどの色票の彩度、明度、色相は照度が低下することによって変化した。その変化の特徴は色票の色相に依存することが明らかになった。また、彼らは色票の彩度及び明度の大きな変化は 10 lx までであり、10 lx 以下（おそらく薄明視レベルであると記載）になると変化の程度が小さくなると述べている。さらに、Shin ら²⁻⁵⁾は、主観評価実験の結果に基づいて薄明視レベルの視覚モデル構築を試みている。

湯尻²⁻⁶⁾は、輝度レベルを広範囲に変化させたときの色票の色の見えをカラーネーミング法によって測定した。カラーネーミング法は、知覚色を直接測る方法であり、知覚色を赤、黄、緑、青から 1 色ないし 2 色の比率によって表す。評価は、まず持ち点 10 点を無彩色成分と有彩色成分に配点する。ここでは黒み成分と白み成分を合わせて無彩色成分としている。次に、持ち点 10 点を与え、有彩色成分を赤、黄、緑、青から 1 色または 2 色を用いて配点する。最後に、再び持ち点 10 点を与え、色票の明るさの程度を明度で評価するというものである。実験の結果、輝度の低下に伴って明度や色みが減少し、薄明視レベル（ここでは 10 lx 以下と記載）になると緑色成分を含む色票は青色の方向に色相が変化することを明らかにした。輝度（照度）の低下に伴って明度や色み（彩度）が減少するのはその他の研究でも同様であり^{2-7)~2-9)}、黄色を除く高彩度色（赤色、緑色、青色、紫色）は色みの効果が明るさに寄与し、実際の明度よりも明るく知覚される²⁻⁷⁾ことなどが明らかになっている。

2.1.2 照度及び輝度が印象評価に及ぼす影響

照度低下に伴う見かけの明るさ、色み（鮮やかさ）の低下によって、印象評価が低下することが報告されている^{2-16)~2-20)}。

Boyce は、オフィス照明の最適化のために、見かけの色の見えに基づく照明環境の満足感について演色性と照度の関係を検討した。その結果、明所視の範囲においても、照度は快適性、鮮やかさ、満足感、明瞭性に影響し、照度が低下することによってこれらの主観評価が低下することを明らかにした²⁻¹⁶⁾。

さらに、Boyce らの別の実験では、照度が低下することによって、快適さ、明瞭さ、明るさ、鮮やかさなどが低下することが示されており²⁻¹⁷⁾、Viénot らは照度が低下すると、活気、明瞭さ、明るさ、快適さなどが低下すると述べている²⁻¹⁸⁾。

空間の快適さ及び心地よさに対する照度と CCT の影響については、Kruithof の研究がある²⁻¹⁹⁾。Kruithof は、照度及び CCT が異なる照明下における実験から、低 CCT は低照度

が快適に感じ、高 CCT は高照度が快適に感じることを明らかにし、その快適領域を示した（図 2-1）。なお、Kruithof が実験に用いた光源は、1941 年当時の白熱ランプ及び蛍光ランプであり、実際の生活環境を想定した場合や LED ランプの場合は Kruithof の快適領域に一致しないとの報告もある²⁻²⁰⁾。このことから、照明の違いによる空間の快適さや心地よさは、目的用途の違いや実験条件の影響を受けると考えられる。

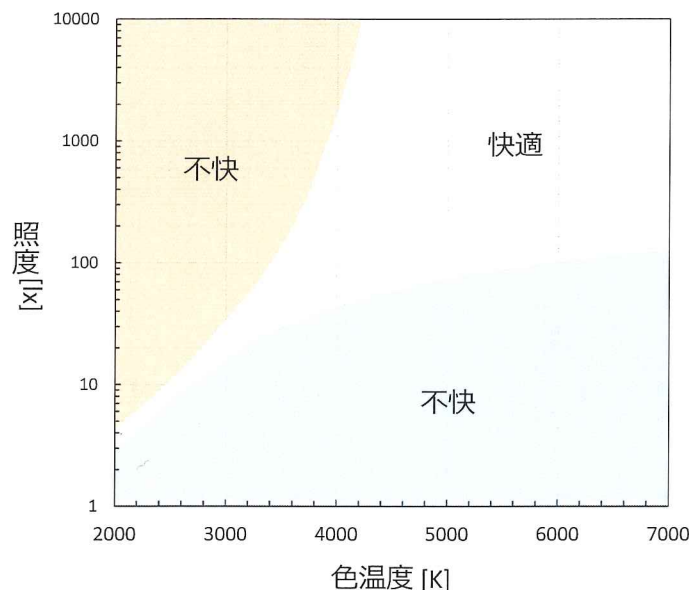


図 2-1 Kruithof のカーブ（快適領域）²⁻¹⁹⁾

2.2 演色性評価方法に関する研究

物体色の色見えに対する光源の演色性（対応用語：color rendering properties）には様々な考え方があり、CIE/JIS 法で採用されている“色の忠実性（fidelity）”^{2-23)、2-24)}の他に、“好ましさ（preference）”²⁻²⁵⁾、“色識別（color discrimination）”²⁻²⁶⁾、“目立ち感（feeling of contrast）”^{2-27)~2-28)}、“記憶色（memory color）”²⁻²⁹⁾、“カテゴリーカルカラー（categorical color）”²⁻³⁰⁾、“色彩調和（color harmony）”²⁻³¹⁾、などがある。

“色の忠実性”以外は客観的な評価及び定量化が極めて難しく、ほとんどの人工光源は自然光の演色性に比べて色の好ましさの点では及ばない²⁻³²⁾ことなどから、現在 CIE が勧告している演色性評価方法は、“色の忠実性”に基づく平均演色評価数 Ra 、特殊演色評価数 Ri のみである。

2.2.1 色の忠実性に基づく演色性評価

現行の CIE²⁻²³⁾ 及び JIS²⁻²⁴⁾ で規定されている演色性評価方法は、相対的演色評価に基づく試験色法を採用している。すなわち、日常において重要となる物体色の代表を試験色として選定し、この試験色を試料光源、及び試料光源と色度が等しいか近似した基準光で照明したときに、両者の色がどの程度同じに見えるか、違って見えるかを相対的に数値化したものである。

CIE/JIS 法では計算に用いる基準の光を試料光源の相関色温度によって決定し、CIE 法では試料光源の相関色温度が 5000 K 以下の場合は黒体放射、5000 K 以上の場合は CIE 昼光を用いることにしている。なお JIS 法においては蛍光灯の光色を考慮し 4600 K を黒体放射、CIE 昼光の境界としている。

試験色は表 2-1 に示す 14 色 (CIE : No.1~No.14) ないし 15 色 (JIS : No.1~No.15) を用いる。No.1~No.8 は後述する平均演色評価数 R_a を算出する際に用い、赤色から赤紫色の色相環をカバーする色相で、等明度 (マンセルバリュー $V=8$)、低~中彩度 (マンセルクロマ $C=4\sim8$) の色である。これらは物体色の平均的な色として定められている。No.9~No.12 は高彩度 (マンセルクロマ $C=8\sim13$) の赤色、黄色、緑色、青色であり、No.13 は欧米人の肌色、No.14 は木の葉の緑色を代表する色、No.15 は JIS 法で追加された試験色であり日本人女性の肌色を代表する色である。試験色のイメージを図 2-2、分光反射率を図 2-3 に示す。

CIE/JIS 法の演色評価数では、試験色 No.1~No.15 に対する基準光、試料光源で照明したときに生じる色ずれの程度 ΔE_i から、式 (2-1) によって試験色それぞれの特殊演色評価数 R_i を求める。

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \dots\dots\dots (2-1)$$

$$\Delta E_i = \sqrt{((\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2)} \dots\dots\dots (2-2)$$

ここで ΔE_i は CIE1964 $U^*V^*W^*$ 色空間を用いて式 (2-2) によって求められる。さらに試験色 No.1~No.8 に対する $R_1\sim R_8$ の平均値を示す平均演色評価数 R_a は式 (2-3) によって求める。

$$R_a = \sum R_i / 8 \dots\dots\dots (2-3)$$

表 2-1 R_a (No.1-8) 、 R_i (No.1-15) の試験色のマンセル値
および系統色名

R_i	R_a	No.	マンセル値	系統色名
特殊 演色 評価 数	平均 演色 評価 数	1	7.5R 6/4	にぶい赤
		2	5Y 6/4	にぶい黄
		3	5GY 6/8	深い黄緑
		4	2.5G 6/6	にぶい緑
		5	10BG 6/4	にぶい青緑
		6	5PB 6/8	うすい青
		7	2.5P 6/8	うすい紫
		8	10P 6/8	うすい赤紫
		9	4.5R 4/13	鮮やかな赤
		10	5Y 8/10	黄
		11	4.5G 5/8	緑
		12	3PB 3/11	青
		13	5YR 8/4	肌色色紙
		14	5GY 4/4	木の葉色の色紙
		15	1YR 6/4	日本人顔色の分光分布

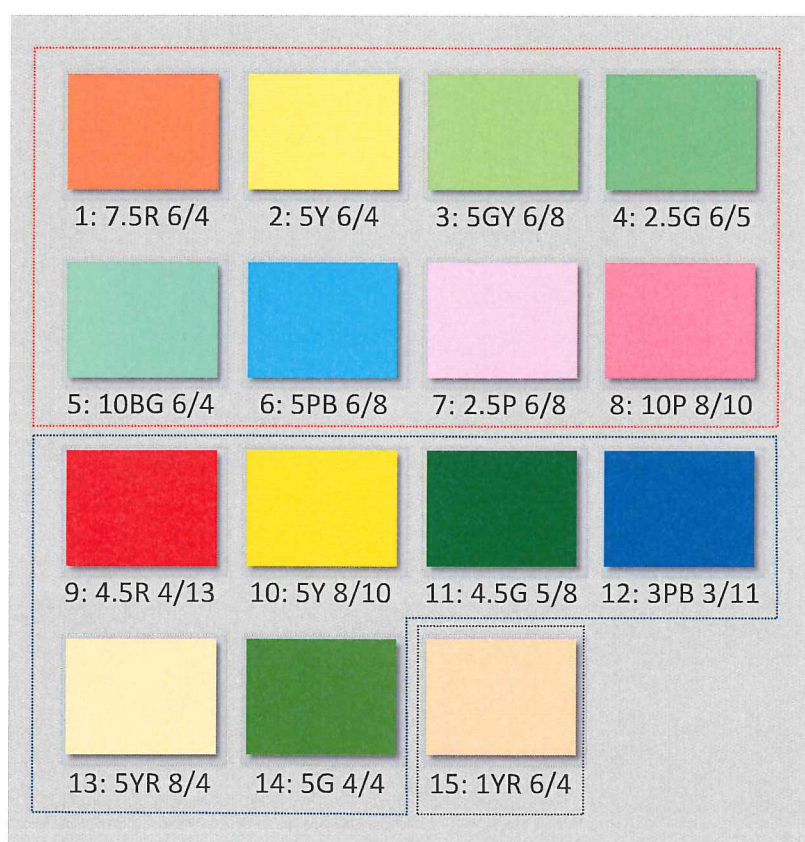


図 2-2 R_a (No.1-No.8) 、 R_i (No.1-No.15) の試験色

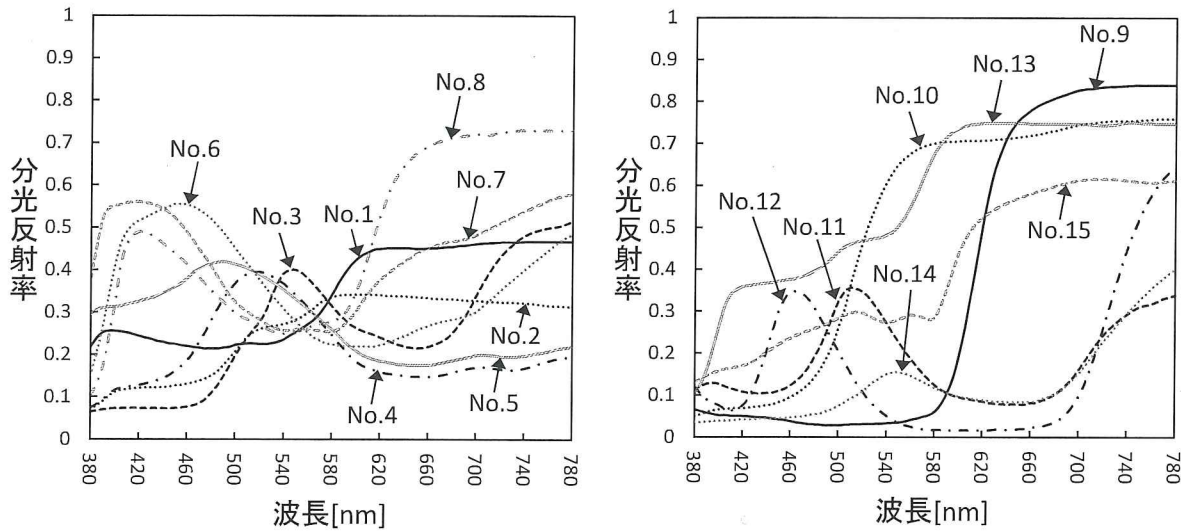


図 2-3 R_a (No.1-8) 、 R_i (No.1-15) の試験色の分光反射率

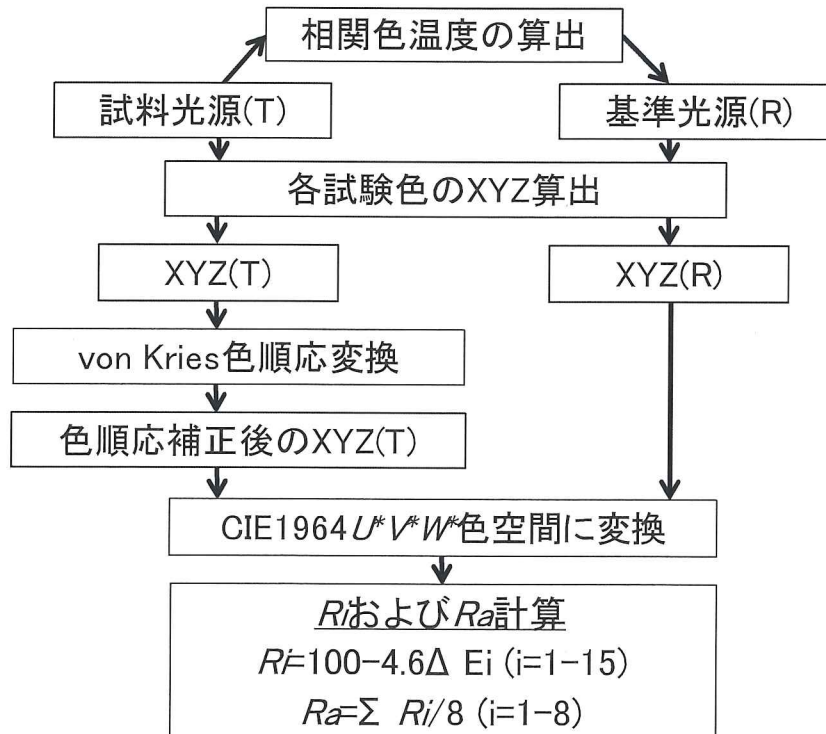


図 2-4 R_a 、 R_i の計算方法

係数 4.6 は相関色温度 3000 K の普通形蛍光ランプの R_a が約 50 になるように定められている。また基準の光と試料光源の光色の差を補正するために、試料光源の三刺激値 (XYZ) に対して von Kries 色順応補正式を用いる。以上の現行演色評価方法の計算方法を図 2-4 に示す。

式 (2-1)、(2-3)、図 2-4 から明らかなように、 $R_a=100$ 、 $R_i=100$ は基準の光と試料光源間で色ずれがなく、色の見えが完全に一致していることを意味する。すなわち、色ずれが大きくなるに従って 100 から引算され、数値が小さくなる構造である。

R_a 、 R_i は勧告されて以降 40 年以上にわたり幅広い分野で光源の指標として用いられてきた。しかし、 R_a 、 R_i は、旧式の色順応補正式 (von Kries 色順応補正式) や現在用いられていない均等色空間で CIE1964 $U^*V^*W^*$ 色空間を用いていること、 R_a の試験色が低～中彩度であること、特殊演色評価数に負値が出る場合があるが負値の意味付けが困難であること、 R_a は算術平均であるため特定の試験色の色が大きくずれた場合でもそのずれが覆い隠されてしまう可能性があること、演色のずれの方向についての情報を含んでいないなど、様々な問題点が指摘されている^{2-33) ~2-34)}。これらの問題点を改良した新しい演色性評価方法を開発するため、技術委員会 TC1-90 (Colour Fidelity Index) が設置され、LED ランプにも適用できる色の忠実性に基づいた方法の検討が進んでいる。

2.2.2 好ましさに基づく演色性評価方法

前項で述べた R_a 、 R_i は基準光に対する色の忠実度のみを示すものであり、その色がどの程度好ましく演色されているのかなど色の好ましさの情報は含有されていない。また R_a 、 R_i は色ずれ方向の情報を含んでいないため、たとえば好ましく見える方向へ色がずれていたとしても R_a 、 R_i の数値からは判断ができない。日常的な照明視環境においては色の忠実度よりも好ましさが求められる場合があり、このような問題を解決するために、Judd の Flattery Index²⁻²⁵⁾ など“色の好ましさ”に基づく演色性評価方法が提案されている。

Bartleson は記憶色の研究²⁻³⁵⁾において、緑色の草や肌色 (白色、黄褐色) など熟知物に対する記憶色をマンセル色票の中から選択させる実験を行った。熟知物とは日常的に見慣れた物、すなわち熟知した対象物であり、その記憶色とは熟知物から想起される色を指す。実験の結果、熟知物の記憶色は主要な色がより強調される傾向にあり、多くの場合、明度、彩度が増加することを明らかにした。熟知物の記憶色は“色の好ましさ”に対応すると考えられ、従って色の好ましさに基づく演色性評価方法は、好ましい色のある色座標上に設定し、その色度と完全一致する光源を 100 とするような方法がとられる。

色の好ましさに基づく演色性評価方法として、最初に提案された Judd の Flattery Index を以下に示す。Flattery Index R_f は試験色として CIE R_a 、 R_i の試験色から No.1~No.8、No.13 (西洋人の肌色)、No.14 (木の葉の緑色) の計 10 色を選定し、これらそれぞれの好ましい色を uv 色度座標上に定めている (図 2-5)。試験色と同様に式の構造も CIE R_a 、 R_i の方法と関連づけられており、Flattery Index R_f は (2-4) 式及び (2-5) 式によって求められる。

$$R_f = 100 - 4.6 \overline{\Delta E_{fk}} \dots\dots\dots (2-4)$$

$$\Delta E_{fi} = 800 \{ (\Delta u_{fi})^2 + (\Delta v_{fi})^2 \}^{1/2} \dots\dots\dots (2-5)$$

ここで (2-4) 式の $\overline{\Delta E_{fk}}$ とは ΔE_{fi} の重価平均値であり、 k は基準光源下の試験色補正量で表 2-2 により求める。Flattery Index R_f は、基準光源と一致したときに 90、好ましい色の色度点に一致したときに 100 となるように定められている。

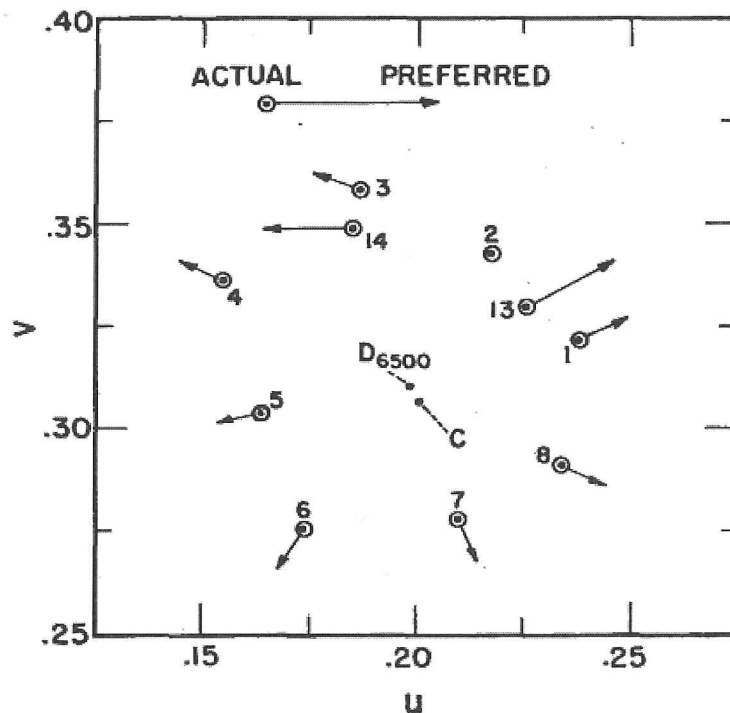


図 2-5 基準光源 (D65) 下の試験色に対する好ましい色の変化量 (uv 色度座標) (2-25)

表 2-2 試験色 10 色のマンセル表記、色度差 (Δu 、 Δv) の予備選択、D65 照明下の色と好ましい色に対する色度の距離の自乗、重みの割合²⁻²⁵⁾

Test Sample	Munsell Notation	Chromaticity Differences			Weight Per Cent,
		Δu	Δv	$[\Delta u^2 + \Delta v^2]^{1/2}$	
1	7.5R 6/4	+ 0.010	+ 0.004	0.011	5
2	5Y 6/4	0.000	0.000	0.000	15
3	5GY 6/8	- 0.010	+ 0.004	0.011	5
4	2.5G 6/6	- 0.010	+ 0.005	0.011	5
5	10BG 6/4	- 0.010	- 0.002	0.010	5
6	5PB 6/8	- 0.006	- 0.010	0.012	5
7	2.5P 6/8	+ 0.004	- 0.010	0.011	5
8	10P 6/8	+ 0.010	- 0.005	0.011	5
13	5YR 8/4	+ 0.020	+ 0.011	0.023	35
14	5GY 4/4	- 0.020	0.000	0.020	15
Weighted Average				0.01490	

2.2.3 色域面積比、目立ち感に基づく演色性評価方法

Judd の Flattery Index など代表とする演色評価数は好ましい色再現を 100 として計算されるが、“色の好ましき”、“色の鮮やかさ”、“照明空間の明るさ感”や“色の識別し易さ”など主観的な色の見えと対応する演色性評価方法として色域面積比に基づく演色性評価方法が提案されている。

色域面積比に基づく演色性評価方法は、JIS²⁻²⁴⁾にも明記されており、色域面積比 G_a は R_a の計算で用いられる 8 試験色 (No.1~No.8) に対して、基準光源の座標 $U^*_{x,1}$ 、 $V^*_{x,1}$ 、テスト光源の座標 $U^*_{k,1}$ 、 $V^*_{k,1}$ によって (2-6) 式によって算出できる。

$$G_a = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^8 (U^*_{k,i-1} V^*_{k,i} - V^*_{k,i-1} U^*_{k,i})}{\sum_{i=1}^8 (U^*_{r,i-1} V^*_{r,i} - V^*_{r,i-1} U^*_{r,i})} \dots\dots\dots (2-6)$$

ここで示す色域面積とは、各光源下で得られた 8 試験色の座標を U^*V^* 2 次元平面上にプロットし、それらを結んだ 8 角形を囲む面積のことをいう。色域面積比 G_a は、テスト光源の色域面積を基準光源の色域面積で除し、100 倍したものである。色域面積比に基づく演色性評価方法は他にも Thornton の CDI (Color-Discrimination Index)²⁻²⁶⁾ などがあり、用いる座標系や色空間は異なるものの計算構造は G_a とほぼ同じである。

照明された有彩色物体群からなる全体印象が、測光的には同じ照度でありながら照明に使用する光源の演色性の差によって人間には異なって知覚される明るさを“明るさ感”いう。

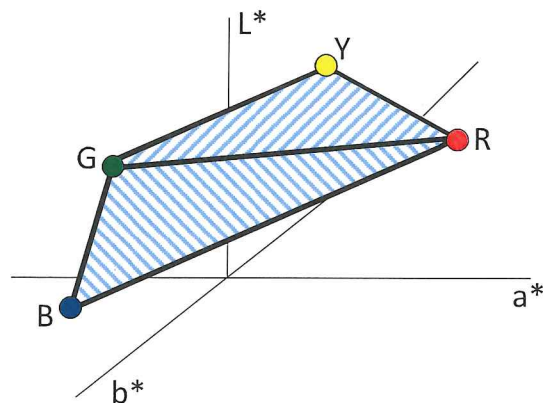
“明るさ感”については、Aston と Bellchamber らによる研究²⁻³⁶⁾を発端として各国で実験検討されており、わが国では橋本ら^{2-27) ~2-28)}が“明るさ感”の成因を有彩色物体群から受ける“色の目立ち感情”で評価できるとし、光源の“目立ち効果”を評価するための演色性評価方法 (FCI : Feeling of Contrast Index) を提案している。FCI は図 2-6 (a) に示す赤色、黄色、緑色、青色の 4 色配色を試験色とし、4 色配色に対する CIELAB 表色系の色域面積によって (2-7) 式から算出する。

$$FCI = 100 \cdot [G_{LAB}(T)/G_{LAB}(D65)]^{1.5} \dots\dots\dots (2-7)$$

ここで、 $G_{LAB}(T)$ はテスト光源下の 4 色配色に対する色域面積であり、 $G_{LAB}(D65)$ は基準光源 (D65) 下の 4 色配色に対する色域面積である。なお FCI で用いる色域面積は、図 2-6 (b) に示すように 4 色配色の色域面積 (赤色／黄色／緑色及び赤色／青色／緑色の三角形の面積の和) である。



(a) FCI 算出に用いる試験色



(b) FCI 算出に用いる色域面積

図 2-6 FCI 算出に用いる試験色および色域面積^{2-27) ~2-28)}

2.2.4 記憶色に基づく演色性評価方法

熟知物の記憶色とは、日常的に見慣れた物、すなわち熟知した対象物から想起される色を指す。記憶色は写真、印刷、カラーテレビの色再現において重要視され、好ましい色再現と記憶色の関係が研究されてきた^{2-35)・2-37)}。光源の演色性の分野においても Smet²⁻²⁹⁾によっ

て熟知物の記憶色に基づく演色性評価方法 (R_m : The general memory colour quality index) が考案されている。 R_m の試験色は、10 種類の熟知物 (青リンゴ、バナナ、オレンジ、ラベンダー、スマーフ、イチゴヨーグルト、キュウリ、カリフラワー、白人の手) であり、(2・8) 式から (2・10) 式によって算出する。

$$S_i(P_i, T_i) = e^{(1/2)} \left[a_{i,3}(P_i - a_{i,1})^2 + 2a_{i,5}(P_i - a_{i,1})(T_i - a_{i,2}) + a_{i,4}(T_i - a_{i,2})^2 \right] \quad (i=1\sim10) \quad (2-8)$$

$$S_a = \sqrt[n]{S_1 \cdot S_2 \cdots S_n} \quad (2-9)$$

$$R_m = 100 \times \left(\frac{2}{e^{p_1 |\ln(S_a)|^{p_2} + 1}} \right)^{p_3} \quad (2-10)$$

ここで、 $S_i(P_i, T_i)$ とは、テスト光源下での試験色 (熟知物) 10 色各々の記憶色に対する類似性の程度であり、 S_a とは試験色 10 色に対する $S_i(P_i, T_i)$ の算術幾何平均値である。 R_m の考え方では、熟知物の記憶色が基準となる色 (ターゲット) であり、すなわちテスト光源下で照らされた熟知物の色がそれらの記憶色と完全に一致する場合に $R_m=100$ を与える。なお、D65 照明下では $R_m=90$ 、F4 では $R_m=50$ となる。図 2・7 に PT 色空間^{2・38)} 上における D65 照明下の熟知物の色度及びそれらの記憶色^{2・39)} を示す。

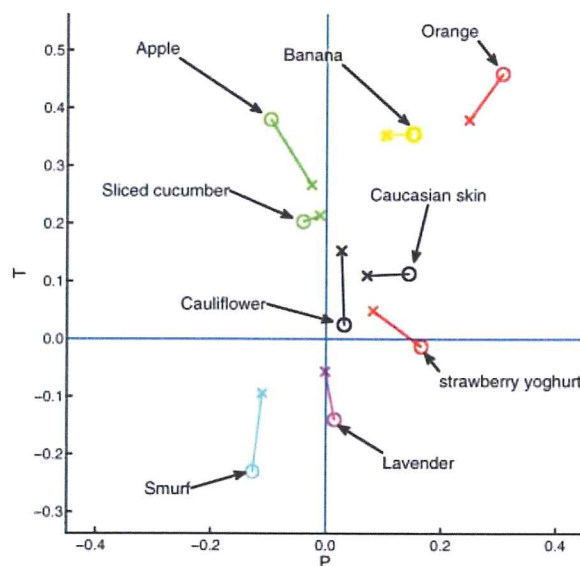


図 2・7 PT 色空間上における D65 照明下の熟知物の色度 (O) 及びそれらの記憶色 (X) ^{2・39)}

2.3 最適な美術館照明に関する研究

第1.2節にも示したように、美術館には厳しい照度規制があり、制限された中で如何に最良の展示空間を作るかが積年の課題となっている。近年、LEDランプの出現により光源の種類は多様を極めており、美術館にとってどのような光源が最適な光源であるのかという課題を解決するために国内外とわず活発な研究が行われている。美術館照明の最適化に関する研究では、主に色の見え（印象）と照度、色の見え（印象）と相関色温度（以下、CCTとする）、色の見え（印象）と演色性及び分光分布の関係について論じられるため、既往研究を照度、CCT、演色性及び分光分布にわけて以下整理する。

2.3.1 照度に関する美術館照明の研究

美術館照明と照度の関係については、Loeら²⁻⁴⁰⁾の研究が知られている。Loeらは油彩画、水彩画を展示するための最適な照明条件（光源、照度、配光）を調べるために、模擬展示室に絵画（複製）を設置し、光源及び照度を変化させた照明下で絵画の見え方、展示室空間の良さをSD法（semantic differential technique）によって評価させた。Loeらは実験結果から、絵画の印象評価を“識別の評価”及び“質の評価”の2因子に分類した。なお“識別の評価”は明るさ、明瞭性、識別性など、“質の評価”は快適さ、魅力度、活気、鮮やかさなどとしている。また、2因子と照明条件の関係についても検討しており、高演色、高色域面積の光源であっても照度が200 lx以下になると2因子の評価は低下し、さらに50 lx以下になると光源間の演色性の差が消失し、どの光源でも類似した評価結果になることを明らかにした。Loeらは、上記の実験結果より油彩画、水彩画の展示照度は200 lxで十分であると述べている。すなわち、言い換えれば200 lx以下は展示照度としては不十分であるともいえる。しかしながら、Loeらの実験は1982年当時の蛍光灯3種類のみを用いた実験であり、これらの結果がLEDランプに適応できるか否かは定かではない。

LEDランプと照度及びCCTの関係については吉澤ら²⁻⁴¹⁾、Zhaiら²⁻⁴²⁾が実験を行っている。吉澤ら²⁻⁴¹⁾は、展示室を模倣した実験室においてCCT及び照度が異なる照明下での絵画に対する色の見えをSD法によって評価した。実験には紫色LED励起白色LEDランプ、青色励起白色LEDランプ及びハロゲンランプが用いられ、白色LEDランプのRaについてはRa 98、Ra 90、Ra 59の3種類とし、CCTは2700、3000、4000、5000Kの4段階が用いられた。照度は50、100、200、400 lxの4段階であり、計28種類の照明条件が設定された。実験の結果、好ましさの評価において高Raの光源は低Raの光源よりも高い評価値を得ており、Ra 100のハロゲンランプの評価値とRa 95の紫色LED励起白色LEDランプの

評価値間には有意差がないことが明らかにされた。しかしながら、過半数が好ましいと評価した照度レベルはハロゲンランプ及び紫色 LED 励起白色 LED ランプともにおおよそ 70 lx であり、高 Ra の光源であっても照度が 70 lx 以下に低下することによって過半数以上が好ましくないと評価することが示された。

Zhai ら²⁻⁴²⁾ は、Kruithof のカーブ²⁻¹⁹⁾（快適領域）が美術館照明及び LED ランプにも適用できるかを検証しており、照度（50、200、800 lx）及び CCT（2850、4000、5000、6500 K）が異なる照明下で展示室を模倣した部屋に設置された実際の絵画の印象を SD 法によって評価している。なお、用いられた光源は 16 色の単色 LED を混光させた白色 LED ランプであり、 Ra は Ra 93～ Ra 97 である。実験の結果、主観評価値に対する因子分析から主要 3 因子（「Comfort」、「Vividness」、「Definition」）を抽出し、照度が低下することによって 3 因子がネガティブに変化すること、及び照度は CCT よりも主観評価に強い影響を与えることを示している。また、実験結果と Kruithof のカーブは部分的にしか適合しないため、美術館照明及び LED ランプに適した快適ゾーンの開発が必要であるとも述べている。

既往研究から、例え Ra が高い光源であっても照度が低下することによって主観評価値が低下することは明らかである。従って、低照度下における演色性は Ra のみでは適切に評価できないと考えられる。

2.3.2 CCT に関する美術館照明の研究

美術館照明の最適な CCT に関する研究については、Scuella²⁻⁴³⁾～²⁻⁴⁴⁾ ら、Pinto ら²⁻⁴⁵⁾、Nascimento ら²⁻⁴⁶⁾ の研究がある。Scuella ら²⁻⁴³⁾ は、異なる CCT の照明下でポストカード（絵）の好ましさを評価させた。その結果、被験者に最も好まれた CCT は 3600 K であると述べている。また、Scuella ら²⁻⁴⁴⁾ はその後の実験において美術館照明にとって好ましい光源の CCT について明らかにするために、“暖かくも冷たくも見えない CCT の光源が好まれる”という仮説を検証している。4 段階の照度レベル（2000、500、200、50 lx）下において、暖かくも冷たくも見えない白色になるようモニタの色を調整させた結果、被験者 8 人の主観評価の平均値は照度レベルに関係なく約 3700K であることがわかった。この結果は、前述した彼らの実験の好ましい CCT の結果²⁻⁴³⁾ とほぼ同じであり、彼らは美術館照明にとって最適な光源の CCT は暖かくも冷たくも見えない CCT の光源であると結論している。

Pinto ら²⁻⁴⁵⁾ は、美術館照明にとって好ましい CCT を明らかにするために、大学生及び美術館来館者を対象に主観評価実験を行った。実験はモニタ上に絵画画像を提示し、その絵

画画像が最も良い印象となるようにモニタの CCT を調整させた。その結果、被験者に最も好まれた CCT はおよそ 5100 K であり、また被験者の所属や環境(学生であるか否かなど)は評価に影響しないことを示した。その後、モニタ実験の結果が実際の照明に対する評価に応用できるか否かを検証するために、異なる CCT の光源を用いて各種照明下で絵画の好ましさを評価させた²⁻⁴⁶⁾。実験の結果、好ましいと評価された CCT の平均値は 5700 K であり、この結果は彼らの前の実験結果(モニタによるシミュレーション実験)²⁻⁴⁵⁾と類似していたことから、絵画にとって最適な光源は一般的に美術館で用いられている光源よりも高い CCT を有する光源であると結論している。

これまでの報告では、研究者によって好ましいとされる CCT が異なっているが、これは実験環境や用いた観察対象物(絵)の違いが大きく影響していると考えられる。

2.3.4 演色性及び分光分布に関する美術館照明の研究

美術館照明と演色性及び分光分布に関する研究では、 Ra を代表する色の忠実性に基づいて最適化を図る研究^{2-47)~2-50)}と、光源の演色の特徴を活かして色の“鮮やかさ”や“明瞭性”など Ra 以外の評価尺度を用いて最適化する研究^{2-51)~2-55)}で大きく二分化している。

従来、演色性の良い光源はすなわち Ra の高い光源であるとされ、高い Ra 値を有する光源が利用されてきた。近年、白熱ランプや昼光に近似した演色性を有する高演色 LED ランプの開発が進み、高演色 LED ランプに対する実験的な検討^{2-47)~2-50)}が活発に行われている。これらの実験結果を踏まえ、実際の美術館への導入もはじまっている。

Mou ら²⁻⁴⁷⁾は、美術館照明へ狭帯域分光分布の白色 LED ランプを応用することを想定し、CIE 昼光と等色する仮想の狭帯域分光分布をシミュレーションにより検討している。シミュレーションの結果、狭帯域の分光分布は放射エネルギーが小さいために損傷指数 DI ²⁻⁵⁶⁾が小さいことを明らかにした。さらに、油彩画の一部分を試験色として演色評価数を算出し、その値を D65 蛍光ランプで算出した値と比較した結果、ほぼ同程度の演色評価数であることを示した。また、試験色のいくつかの色では狭帯域分光分布が D65 蛍光ランプよりも高い演色評価数を得たことから、狭帯域分光分布の白色 LED ランプは新しい美術館照明として期待できると述べている。

Shanda ら^{2-48)~2-50)}は、美術館照明にとって最適な LED ランプの分光分布を求める手法として、最新の測色計算方法(CIE-CAM02UCS²⁻⁵⁷⁾)を用いた忠実性に基づく新しい演色性評価方法を提案している。彼らは、画家が制作する際に見ていたであろう色を演色色再現のターゲットとし、20 世紀以前は自然昼光がアトリエの主な照明光源だったこと、及び保存、

効率の問題から現在の美術館で用いられている光源が 3500 K であることから、6500 K・高照度から 3500 K・低照度に CCT 及び照度を変化させた上で最も色の歪み（色差）が最小となる光源の分光分布を検討している。

一方、光源の演色性を活かした最適化に関しては、特に欧米で活発に研究されている²⁻⁵¹⁾~²⁻⁵⁵⁾。これらは照度の低下や変退色によって低明度化、低彩度化した美術作品の色を光源によって補正するという考えである。Thornton²⁻⁵¹⁾ は、人間の視感度と対応するピーク波長（prime color）を有する分光分布の明瞭性（visual clarity）の高さに言及しており、prime color の分光分布が低照度環境で有用であると述べている。

Berns²⁻⁵²⁾ は、狭帯域分光分布の演色効果について仮想の分光分布によるシミュレーション分析を行い、赤色・緑色・青色の狭帯域分光分布は、有彩色物体の彩度を強調させる効果ないし低下させる効果があり、教会や美術館でその演色効果が有効に活用できると述べている。

Viénot ら²⁻⁵³⁾ は、褪色し、色がくすんだ美術作品の色の印象が最も良い状態となる LED ランプの分光分布をシミュレーション及び主観評価実験により検討した。その結果、赤色・緑色・青色ないし赤色・シアン色・青色の 3 波長を組み合わせた LED ランプで照明することによって褪色前の色に近い見えを与えることができると述べている。

Liu ら²⁻⁵⁴⁾ は、照明の好ましさにについて明らかにするために、分光分布を調整できる混光 LED ランプの照明装置を用いて、熟知物が最も“naturalness”、“preferred”に見えるように混光 LED の混光比率（RGB（高彩度化）から AGB（低彩度化）に変化）を調整させた。さらに、熟知物と同様な方法で絵（3 種類；アメリカ人に馴染みのある絵 2 種類、抽象画 1 種類）が“preferred”に見える混光比率についても検討した。また、照明光の好ましさに対する文化の影響についても検討するために、中国人グループ、アメリカ人グループの結果を比較した。その結果、青果物については“naturalness”、“preferred”ともに文化による違いが認められず、両国の被験者とも“naturalness”と評価した色よりも、より鮮やかな色に照明する混光比率を“preferred”と評価した。しかし、絵の場合は被験者にとって馴染みがあるか否かによって混光比率の結果が異なり、とくに抽象画においては文化差および個人によって好ましいと評価される色が異なることを明らかにした。

Anders ら²⁻⁵⁵⁾ は、金色の美術作品を照明する LED ランプについて検討しており、CCT が 2900 K かつ Ra 90 以上となるような白色 LED ランプの分光分布を求めている。このように、個々の美術作品にとって最適な分光分布、すなわち画材と色の見えの関係を踏まえた上で最適な分光分布を求める試みも行われている。

2.4 結論

本章では、演色性及び照度と色の見えに関する諸研究、さらに最適な美術館照明に関する諸研究を概観した。既往研究から明確になった研究課題を以下に示す。

1. 照度が低下することによって有彩色物体の色の見えは変化し、その見えの変化に伴って有彩色物体から受ける印象評価も変化する。
2. 演色性評価方法に関する研究では、色の忠実性、色の好ましさなど様々な方法が提案されているが、照度が変わったときの色の見えの影響を取り入れた方法はない。
3. 光源の演色性及び効率を考えた分光分析の最適化は、 Ra を最大化することでなされてきた。しかし、光源や照度が異なる照明下での色の見えと Ra との関わりについて検討した研究はなく、 Ra が美術館の演色性を評価するのに適切であるかについては不明確である。また、高い Ra を有する高演色形の光源であっても照度が低下することによって主観的な好ましさなどの印象が低下することから、 Ra は異なる照度下の色の見えを適切に評価できないと考えられる。

美術館照明を最適化するには、ターゲットとなる指標が必要である。最適な美術館照明を検討するためには、分光分布、照度、色の見えの関係を明らかにし、照度による色の見えの影響を考慮した新しい演色性評価方法が必要であると考ええる。

第 3 章

美術館照明の実態調査

第3章 美術館照明の実態調査

3.1 はじめに

従来、美術館では高い演色性を有する光源を用いることが推奨されており、白熱ランプや高演色形蛍光ランプが主流となっている。しかし、LED ランプの技術向上により美術館照明に LED ランプが導入されつつあり、美術館照明の多様化が進んでいる。美術館照明を最適化するためには、美術館照明の現状を把握する必要がある。

本章の目的は、国内美術館における照明環境の実態調査結果を述べ、美術館照明の問題、課題を提起することである。

3.2 実態調査

美術館照明の現状を把握するために、国内美術館の照明環境調査を行った。表 3-1 に調査対象とした美術館の形態、主な収蔵・展示作品の分野、測定年を示す。No.1 (A 美術館) は東北地方の美術館であり、No.2 (B 美術館) ～No.5 (E 美術館) は関西地方の美術館であり、No.6 (F 美術館) ～No.8 (H 美術館) は九州地方の美術館であり、No.9 (I 美術館) ～No.10 (J 美術館) は中国地方の美術館である。なお常設展示、特別展示など展示形態は問わず測定を行った。調査期間は 2013 年 3 月～2014 年 1 月である。

測定はコニカミノルタ社製分光放射照度計 CL-500A を用い、各施設展示室の照明を測定した（波長：360-780 nm、波長間隔：1 nm）。展示ケース内や美術作品に触れる位置では測定ができないため、作品に対してなるべく平行となる位置から光源を狙い測定した。従って、以下の図表に示す測定結果はすべて参考値である。

表 3-1 調査対象とした美術館の主な収蔵・展示作品の分野、測定年

地方	No.	施設名	主な収蔵・展示作品の分野	測定年
東北	1	A美術館	日本美術	2013
	2	B美術館	近現代美術(西洋、日本)	2013
関西	3	C美術館	近現代美術(西洋)	2013
	4	D美術館	東洋古美術	2013
	5	E美術館	東洋美術	2013
九州	6	F美術館	東洋美術	2013
	7	G美術館	近現代美術(西洋、日本)	2013
	8	H美術館	近現代美術(西洋、日本)	2013
中国	9	I美術館	東洋美術	2014
	10	J美術館	近現代美術(西洋、日本)	2014



図 3-1 コニカミノルタ社製分光放射照度計 CL-500A

画像出典：コニカミノルタホームページ

<http://www.konicaminolta.jp/instruments/products/light/cl500a/>

3.2.1 東北地方

図 3-2 は東北地方の美術館の展示室照明の相対分光分布を示し、表 3-2 は展示室照明の照度、相関色温度（CCT）、 xy 色度図、平均演色評価数（ Ra ）を示している。図表中の a～f はすべて A 美術館の結果である。

各展示室照明の実測データ（分光分布）から、主に高演色形蛍光ランプ及び LED ランプ（青色励起光黄色蛍光体タイプの白色 LED、以下 LED-BY）を用いていることが判明し、 Ra 82～ Ra 98、CCT 約 2600 K～4200 K であることがわかった。LED-BY ランプは、工芸品展示室（c）で Ra 82、日本画展示室（d）で Ra 96 であり、 Ra 96 については一般に普及している LED-BY ランプよりも高い Ra 値であり、高演色形の LED ランプである。

照度は最も低い実測値が 6 lx であり、これは日本画展示室であった。この美術館では主に日本美術を取り扱っているため、6 lx～48 lx と全体的に照度が低く、CIE 技術報告書 No.157^{3・1)} の照度推奨値よりも低い値に設定されていた。

3.2.2 関西地方

図 3-3 は関西地方の美術館の展示室照明の相対分光分布を示し、表 3-3 は展示室照明の照度、相関色温度（CCT）、 xy 色度図、平均演色評価数（ Ra ）、特殊演色評価数（ Ri ）を示している。図表中の g～h は B 美術館であり、i～j は C 美術館であり、k～l は D 美術館であり、m～n は E 美術館の結果である。

各展示室照明の実測データ（分光分布）から、ハロゲンランプ及び蛍光ランプを用いていることが判明し、その照明特性は Ra 67～ Ra 99、CCT 約 3600 K～4400 K であることがわ

かった。B 美術館の版画展示室 (h) は演色性の悪い普通形蛍光灯 ($Ra\ 67$) が使われており、これは美術館照明としては極めて珍しいケースであった。

照度は最も低い実測値で 12 lx であり、B 美術館の版画展示室 (h) を除いて $12\text{ lx}\sim 147\text{ lx}$ と低い照度であった。CIE 技術報告書 No.157 において油彩画の照度推奨値は 200 lx 以下、日本画は 50 lx 以下であるが、どの美術館においても推奨値よりも低い値に設定していることがわかった。また C 美術館 (i, j) のように、同じ分野の展示作品であっても展示室によって光源の CCT や照度を変えている美術館があることも確認した。

3.2.3 九州地方

図 3-4 は九州地方の美術館の展示室照明の相対分光分布を示し、表 3-4 は展示室照明の照度、相関色温度 (CCT)、 xy 色度図、平均演色評価数 (Ra)、特殊演色評価数 (Ri) を示している。図表中の o~p は F 美術館であり、q~s は G 美術館であり、t~u は H 美術館の結果である。

各展示室照明の実測データ (分光分布) から、ハロゲンランプ、高演色形蛍光灯、LED-BY ランプを用いていることが判明し、照明特性は $Ra\ 85\sim 99$ 、CCT 約 $2430\text{ K}\sim 4410\text{ K}$ であった。r の油彩画展示室に用いられていた LED-BY ランプは現在一般に広く普及しており、 $Ra\ 85$ であるが高彩度の赤色の特殊演色評価数は $R9\ 34$ であり、特に赤色の色再現が劣る。

照度は最も低い実測値で 11 lx であり、G 美術館の彫刻展示室 (q) を除いて $11\text{ lx}\sim 142\text{ lx}$ と低い照度であった。最も低い実測値であった 11 lx は F 美術館の反物展示室 (o) であり、これは反物などの染色品は特に耐光性が弱いことによるものだと考えられる。

九州地方の美術館においても CIE 技術報告書 No.157 における照度推奨値と比較して、低い照度に設定されていることがわかった。

3.2.4 中国地方

図 3-5 は中国地方の美術館の展示室照明の相対分光分布を示し、表 3-5 は展示室照明の照度、相関色温度 (CCT)、 xy 色度図、平均演色評価数 (Ra)、特殊演色評価数 (Ri) を示している。図表中の v~y は I 美術館であり、z~bb は J 美術館の結果である。

各展示室照明の実測データ (分光分布) から、ハロゲンランプ及び高演色形蛍光灯を用いていることが判明し、その照明特性は $Ra\ 92\sim Ra\ 97$ 、相関色温度約 $2520\text{ K}\sim 3670\text{ K}$ であることがわかった。

照度は最も低い実測値で 4 lx～140 lx であり、どの美術館においても低い照度であることを確認した。実測値の 4 lx は J 美術館油彩画の展示室 (z) であり、推奨照度値の 200 lx に比べて極端に低い照度である。これは、耐光性の強弱はもちろんのこと美術作品の価値や経年劣化の状態を考慮して照度が設定されていることを示唆している。

表 3-2 展示室照明の照度、相関色温度 (CCT)、 xy 色度図、平均演色評価数 (Ra) (東北地方)

	a	b	c	d	e	f
場所	展示室-工芸品	展示室-工芸品	展示室-工芸品	展示室-日本画	展示室-日本画	展示室-日本画
照度	37	11	48	24	17	6
CCT	2636	2659	2944	4183	2636	2650
x	0.467	0.464	0.442	0.372	0.467	0.467
y	0.414	0.412	0.408	0.368	0.413	0.415
Ra	97	92	82	96	98	95

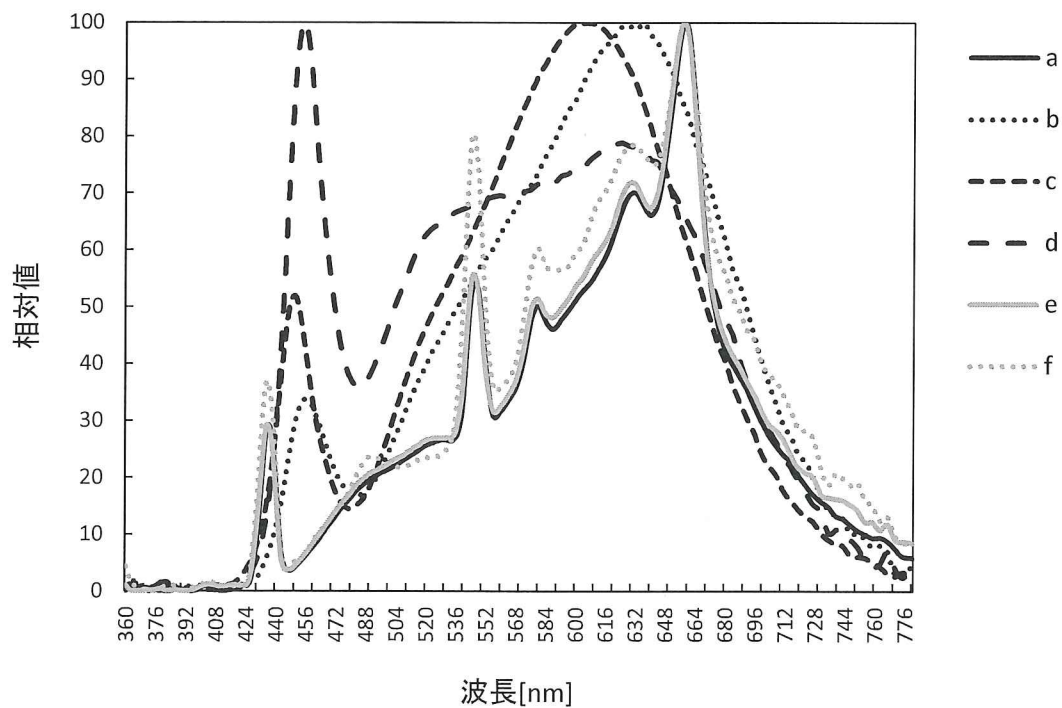


図 3-2 展示室照明の相対分光分布 (東北地方)

表 3-3 展示室照明の照度、相関色温度 (CCT)、 xy 色度図、平均演色評価数 (R_a)、特殊演色評価数 (R_i) (関西地方)

	B美術館		C美術館		D美術館		E美術館	
	g	h	i	j	k	l	m	n
場所	展示室-油彩画	展示室-版画	展示室-油彩画	展示室-油彩画	展示室-絵巻	展示室-日本画	展示室-日本画	展示室-日本画
照度	81	778	12	147	30	28	12	12
CCT	3331	3785	2448	4400	2334	2325	2980	2980
x	0.418	0.395	0.482	0.364	0.498	0.499	0.436	0.436
y	0.402	0.396	0.414	0.364	0.422	0.422	0.399	0.399
R_a	98	67	99	98	95	95	95	95
R_1	100	62	99	97	96	96	93	93
R_2	98	79	100	97	97	97	96	96
R_3	94	85	100	99	92	92	99	99
R_4	99	62	99	98	97	96	93	93
R_5	98	61	99	97	95	94	93	93
R_6	96	67	99	97	94	93	95	95
R_7	98	78	99	99	99	98	97	97
R_8	99	40	99	98	94	92	91	91
R_9	99	-64	98	94	82	78	80	80
R_{10}	93	43	99	96	88	87	93	93
R_{11}	96	48	99	98	94	93	92	92
R_{12}	90	47	99	95	86	85	93	93
R_{13}	99	66	99	96	97	96	94	94
R_{14}	97	91	100	99	94	94	99	99
R_{15}	99	55	99	96	96	95	92	100

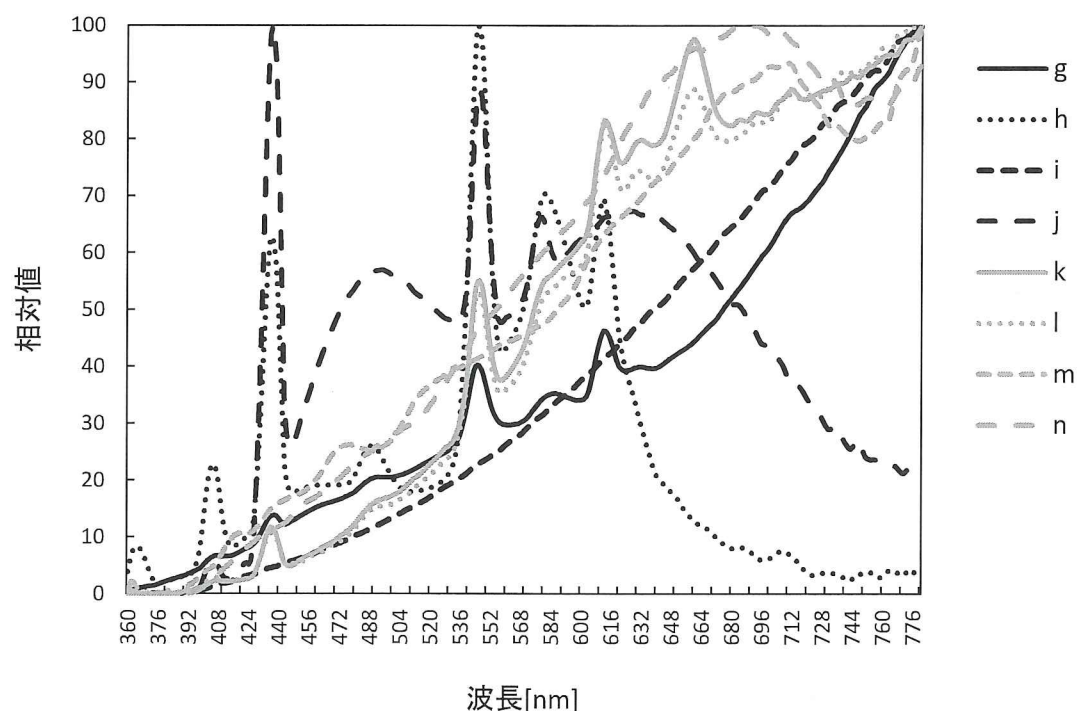


図 3-3 展示室照明の相対分光分布 (関西地方)

表 3-4 展示室照明の照度、相関色温度 (CCT)、 xy 色度図、平均演色評価数 (R_a)、特殊演色評価数 (R_i) (九州地方)

	F美術館		G美術館			H美術館	
	o	p	q	r	s	t	u
場所	展示室-反物	展示室-工芸品	展示室-彫刻	展示室-油彩画	展示室-油彩画	展示室-水墨画	展示室-油彩画
照度	11	92	612	142	58	93	94
CCT	2425	3426	4414	3179	3991	2749	3157
x	0.485	0.410	0.366	0.427	0.387	0.458	0.427
y	0.416	0.394	0.378	0.406	0.400	0.413	0.403
R_a	99	94	89	85	85	99	98
R_1	99	96	85	84	81	99	98
R_2	99	95	91	88	88	99	99
R_3	97	90	91	92	91	99	99
R_4	99	95	86	86	82	99	98
R_5	99	95	86	83	81	99	99
R_6	99	92	85	84	80	99	99
R_7	100	95	96	89	96	99	98
R_8	99	96	89	73	87	100	96
R_9	97	91	71	34	63	99	93
R_{10}	97	86	76	73	70	98	99
R_{11}	100	95	80	86	74	99	98
R_{12}	98	86	77	71	70	97	99
R_{13}	99	96	87	84	82	99	98
R_{14}	98	94	95	95	95	99	100
R_{15}	99	97	86	79	81	99	98

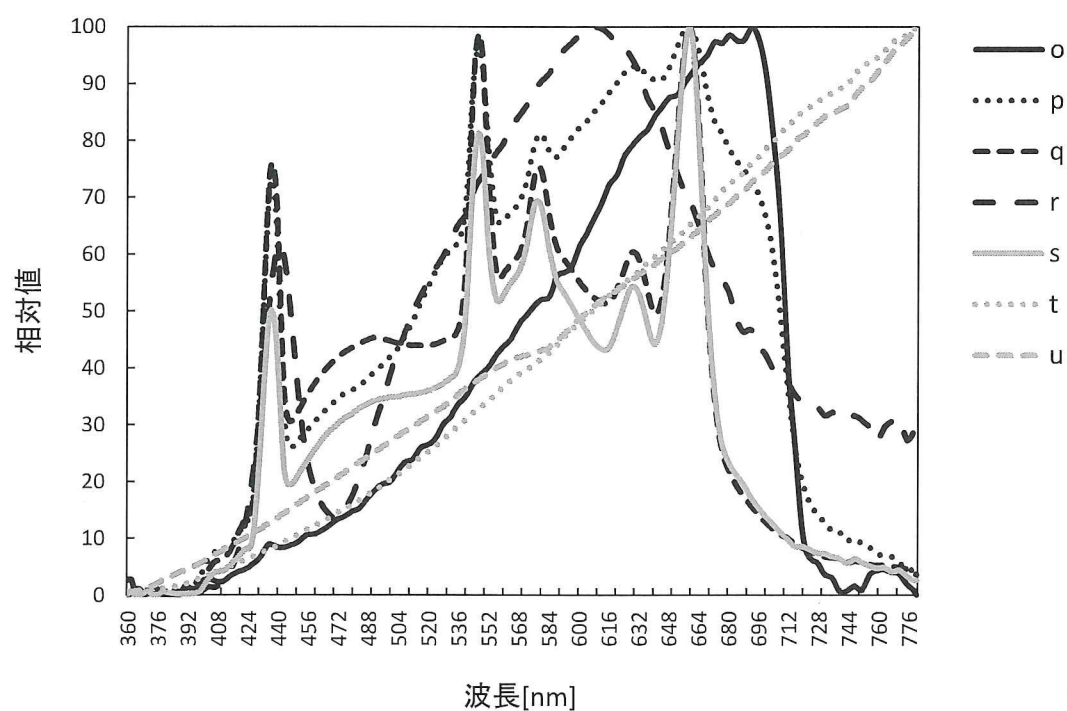


図 3-4 展示室照明の相対分光分布 (九州地方)

表 3-5 展示室照明の照度、相関色温度 (CCT)、 xy 色度図、平均演色評価数 (Ra)、特殊演色評価数 (Ri) (中国地方)

	I美術館				J美術館		
	v	w	x	y	z	aa	bb
場所	展示室-水彩画	展示室-日本画	展示室-日本画	展示室-油彩画	展示室-油彩画	展示室-日本画	展示室-油彩画
照度	86	12	15	82	4	53	140
CCT	3671	2618	2667	2815	2516	2934	2864
x	0.399	0.469	0.464	0.453	0.477	0.439	0.448
y	0.394	0.416	0.412	0.412	0.415	0.400	0.410
Ra	93	97	97	97	97	92	96
R_1	94	98	100	98	96	95	99
R_2	94	98	99	98	98	96	99
R_3	89	93	92	94	98	87	90
R_4	95	98	97	98	96	93	97
R_5	93	98	99	97	96	93	99
R_6	90	96	97	96	97	91	96
R_7	95	97	97	98	98	94	95
R_8	94	98	97	98	94	92	94
R_9	84	95	98	96	88	82	93
R_{10}	82	93	94	93	94	84	93
R_{11}	93	99	98	97	95	89	98
R_{12}	83	91	91	93	94	83	91
R_{13}	94	99	100	98	97	96	99
R_{14}	93	95	95	96	98	91	93
R_{15}	94	98	98	99	96	95	97

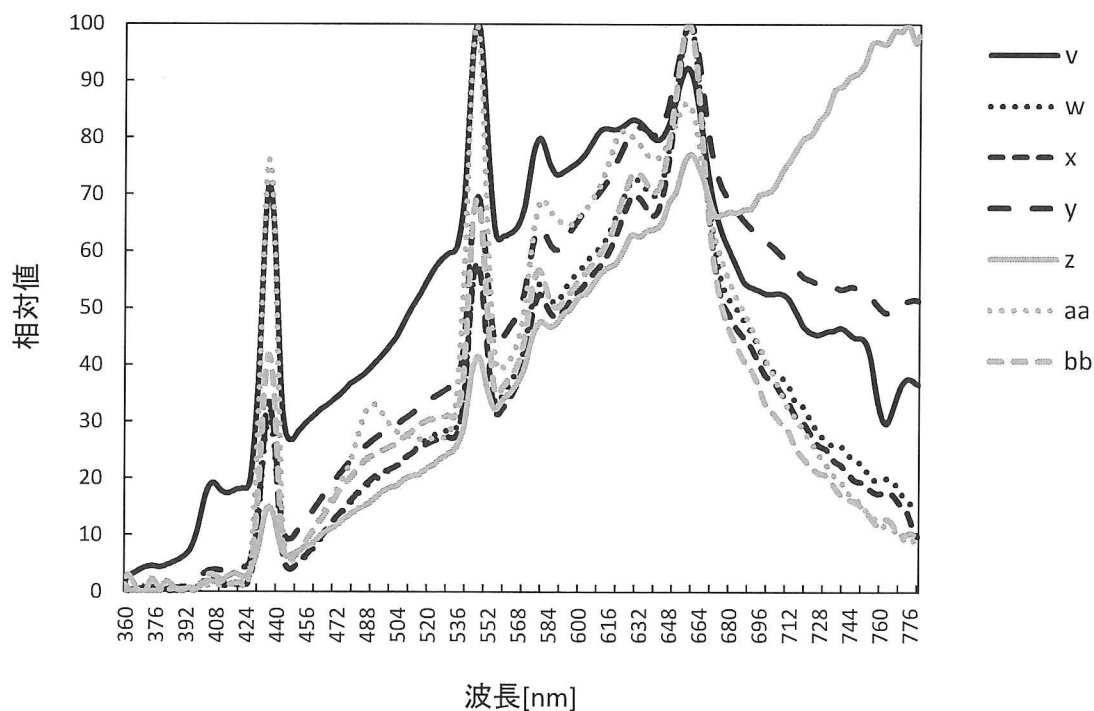


図 3-5 展示室照明の相対分光分布 (中国地方)

3.3 結論

本章では美術館照明の現状を把握するために、国内美術館を主とする照明環境の実態調査を行い、その結果から以下のことを明らかにした。

1. 多くの美術館において高演色形の光源（少なくとも Ra 90 以上）が使用されていることを確認した。
2. 多くの美術館で低色温度のランプが用いられていた。ICOM（第 1.2 節表 1-2）の推奨色温度は油彩画で約 4000 K、日本画や染色物で約 2900 K としているが、国内の美術館では 4000 K 以下の光源を用いている場合が多く、4000 K 以上の光源は彫刻など特に耐光性が強い美術作品の展示に用いられていた。美術館照明が低色温度であるのは「損傷の可能性は、色温度の上昇に伴って上昇する」という Cuttle の報告^{3・1)}が反映されていると考えられる。
3. 光源の種類は美術館によって様々であったが、多くの美術館で白熱電球やハロゲンランプの用いられていることを確認した。これは、白熱電球やハロゲンランプは演色評価数が高く、蛍光ランプに比べて点光源に近く配光制御の自由度が高いため展示照明に妥当な光源であるとともに、蛍光ランプに比べて紫外域のエネルギーが少ないからであると考えられる。またいくつかの美術館では LED ランプ（青色 LED 励起黄色蛍光体発光タイプの白色 LED ランプ：LED-BY）の使用を確認した。LED-BY は現在、一般に広く普及している LED ランプであり、美術館では高演色形のものが利用されていた。
4. 照度については、CIE の技術報告書 No.157 において油彩画推奨値は 200 lx であるのに対し、実際は 200 lx を下回っている場合が多く、測定点によっては 4 lx という極めて低いほぼ薄明視レベルの照度の場合もあった。また染色物の展示照明では推奨値 50 lx に対し、8 lx と極めて低い照度の場合もみられた。実態調査の結果から、調査した国内美術館では CIE 技術報告書 No.157 よりも更に低い照度に設定していることが明らかになった。
5. 調査した国内美術館では、施設や美術作品の分野の違いによる光源の相関色温度、照

度の違いが僅かであった。このことから、美術館照明は美術作品の耐光性の強弱ももちろん考慮されるが、さらに美術作品の価値や経年劣化の状態、学芸員などの意図なども考慮して決定されていると考えられる。

次章では、異なる照度下における色の見えと Ra 、 Ri の対応関係を等色実験により確認し、 Ra 、 Ri が低照度下の色の見えを表しているのかを検証する。

第 4 章

CIE/JIS の色の忠実性評価方法と照度の関係

第4章 CIE/JIS の色の忠実性評価方法と照度の関係

4.1 はじめに

第2章 2.1 節で示したように照度の違いは物体色の見えに影響を及ぼし⁴⁻¹⁾、色の鮮やかさ、好ましさ、自然らしさなどの色彩印象⁴⁻²⁾に影響するとともに色識別⁴⁻³⁾、作業効率⁴⁻⁴⁾などを低下させることが知られている。

前章の国内美術館照明の実態調査の結果、国内美術館では CIE 技術報告書 No.157⁴⁻⁵⁾ の照度推奨値よりも低い照度に設定される場合が多いことが明らかになった。特に光に敏感な日本画や染色品の展示では数 lx という極めて低い照度に設定されていることも確認した。このような展示室においては美術作品の色は戸外のような高照度下と比べ暗く、くすんで見えることが推定される。

現在、美術館照明は演色評価数 R_a 、 R_i を基準に選択されているが、 R_a 、 R_i の計算には照度による色の変化は考慮されていない。異なる照度下における色見えと R_a 、 R_i の対応関係に言及した報告の例はなく、 R_a 、 R_i が低照度下の色見えを表しているのかを検証する必要がある。

本章の目的は、美術館用高演色形蛍光ランプ照明について、照度を変化させたときの色見えの変化を測色解析及び主観評価実験により検討し、異なる照度下での色見えが R_a 、 R_i で評価できるのかを検証することである。

4.2 分光分布及び照度が異なる場合の色見えの測色解析

物体色見えは、光源、照度、物体の背景色など様々な環境要因によって変化する。このような照明環境の違いによる色見えの変化を予測し、評価するために色見えモデル (CIECAM : CIE Color Appearance Model) が用いられる。CIECAM は「大腦で処理されているような最終的な出力、見え方 (アピアランス) に相当する量、たとえば色の名前とか、色見えを表す3つの属性である明るさ、鮮やかさ、色相といったものを定量化しようとするもの」⁴⁻⁶⁾ である。CIE では、1997 年に CIECAM97s⁴⁻⁷⁾ が制定され、その後、2002 年に CIECAM97s を改良した CIECAM02⁴⁻⁸⁾ が制定されている。CIELAB⁴⁻⁹⁾ や CIELUV⁴⁻¹⁰⁾ が明度、クロマ、色相を与えるのに対し、CIECAM02 では明度、明るさ、クロマ、彩度、カラフルネス、色相を与える。本章で扱う知覚的な属性の相関量の属性、記号、説明を表 4-1 に示す。なお用語の説明は JIS Z 8113 : 1998 「照明用語」⁴⁻¹¹⁾ に準拠する。

CIECAM は異なる照度下での色見えの変化を予測することができるため、本項では最新

モデル CIECAM02 を用いて、美術館用高演色形蛍光ランプ照明に対する異なる照度下での色の見えの変化を解析した。

4.2.1 解析方法

美術館用高演色形蛍光ランプ照明に対する異なる照度下での試験色の見えを色の見えモデル CIECAM02 (CIE Color Appearance Model 2002) によって計算し、照度の違いによって色の見えがどのように変化するのかを検証した。

(a) 照明条件

解析は低照度が強いられる日本画展示照明を想定し、美術館・博物館用高演色形蛍光ランプ（電球色タイプ、以下 FL-EDL）を用いた。ランプの分光分布を図 4-1 に示し、特性を表 4-2 に示す。

照度は 1000 lx、200 lx、50 lx、10 lx の 4 条件とした。選定理由は、(a) 1000 lx : 表面色の視感比較方法⁴⁻¹²⁾における観察照度（原則として 1000 lx 以上）、(b) 200 lx : Loe ら⁴⁻³⁾の実験結果における油彩画、水彩画の好ましい展示照度、(c) 50 lx : CIE 技術報告書 No.157⁴⁻⁵⁾における日本画展示推奨照度、(d) 10 lx : 前章の調査結果から実際の美術館で設定される照度の最低値、である。

(b) 試験色

試験色は色相環を万遍なくカバーした 9 色相を用いた。図 4-2 に試験色 9 色相のイメージ、表 4-3 にマンセル値、図 4-3 に分光反射率を示す。分光反射率はコニカミノルタ社製分光測色計 CM-700d を用いて各色票を 3 点測定した平均値とした（波長：360-740 nm、波長間隔：10 nm、測定径：Φ8 mm、図 4-4）。なお測色計算は測定結果を 5 nm 間隔に線形補間した 400-700 nm の値を用いた。図 4-5 に FL-EDL の分光放射率及び各試験色の分光反射率で算出した $L^*a^*b^*$ 値から a^*b^* 、 L^*a^* の各座標図を示す。

表 4-1 知覚的な属性の相関量の属性、記号、説明

属性	記号	説明
明度(ライトネス)	J	同様に照明されている白又は透過率が高い面の明るさと比較して、相対的に判断される対象面の明るさ。
明るさ(ブライトネス)	Q	ある面から発している光の強弱の見え方の基になる視感覚の属性
クロマ (彩度)	C	同様に照明されている白又は透過率が高い面の明るさとの比率として判断される対象面の有彩色の強さの度合い。
	a _C	クロマに基づく赤-緑成分
	b _C	クロマに基づく黄-青成分
カラフルネス (鮮やかさ)	M	ある面の知覚色について、有彩色の度合いが強い弱いかの基になる視感覚の属性
	a _M	カラフルネスに基づく赤-緑成分
	b _M	カラフルネスに基づく黄-青成分

表 4-2 FL-EDL のランプ特性

x	0.435
y	0.408
CCT	3061
Δuv	0.002
主波長	582
ピーク波長	658
R _a	96
R ₁	99
R ₂	98
R ₃	89
R ₄	97
R ₅	98
R ₆	95
R ₇	95
R ₈	95
R ₉	95
R ₁₀	91
R ₁₁	98
R ₁₂	90
R ₁₃	99
R ₁₄	93
R ₁₅	98

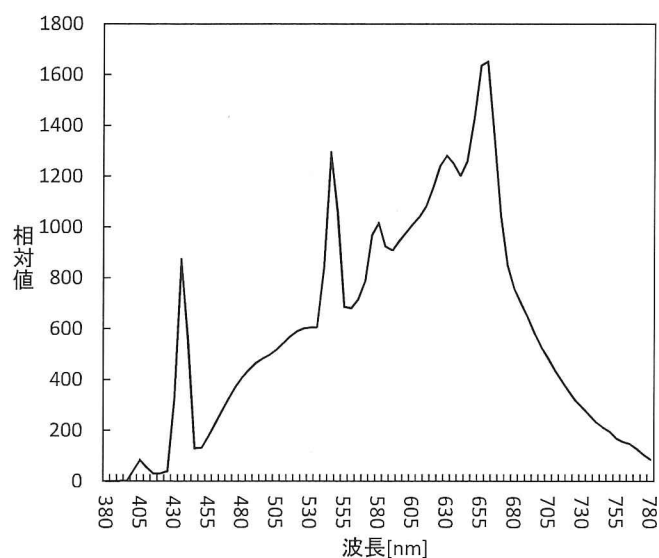


図 4-1 FL-EDL の分光分布



図 4-2 試験色 9 色の色イメージ

表 4-3 試験色 9 色のマンセル値

No.	H	V/C
1	5R	4/12
2	10R	6/12
3	5Y	8/10
4	5GY	7/10
5	5G	4/6
6	10BG	4/6
7	5PB	4/10
8	10PB	4/8
9	10P	4/6

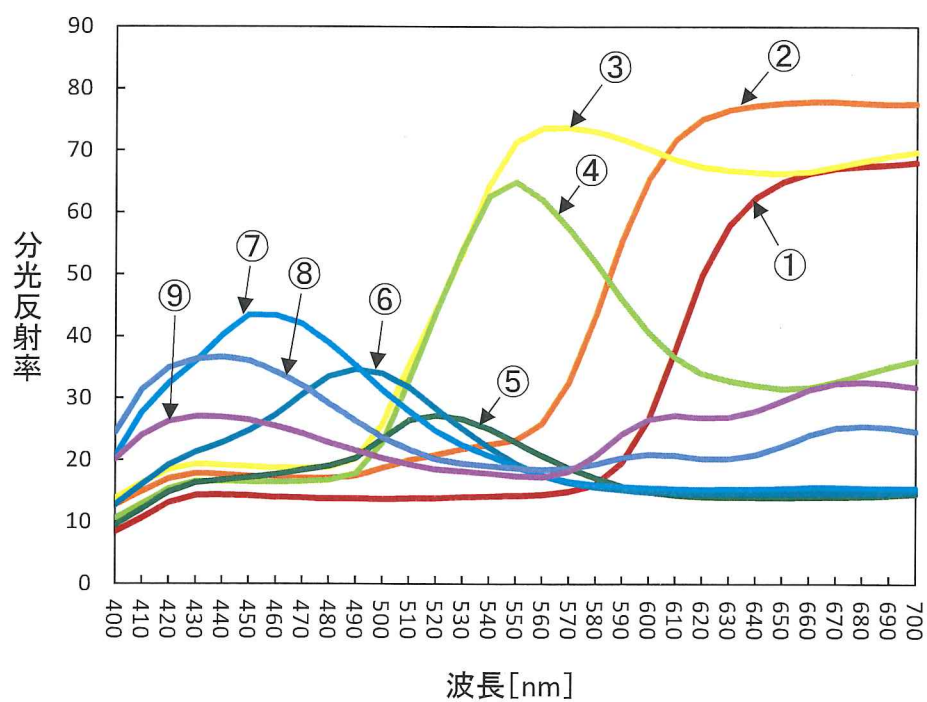


図 4-3 試験色 9 色の分光反射率



図 4-4 コニカミノルタ社製分光測色計 CM-700d

画像出典 : <http://www.konicaminolta.jp/instruments/products/color/cm700d/>

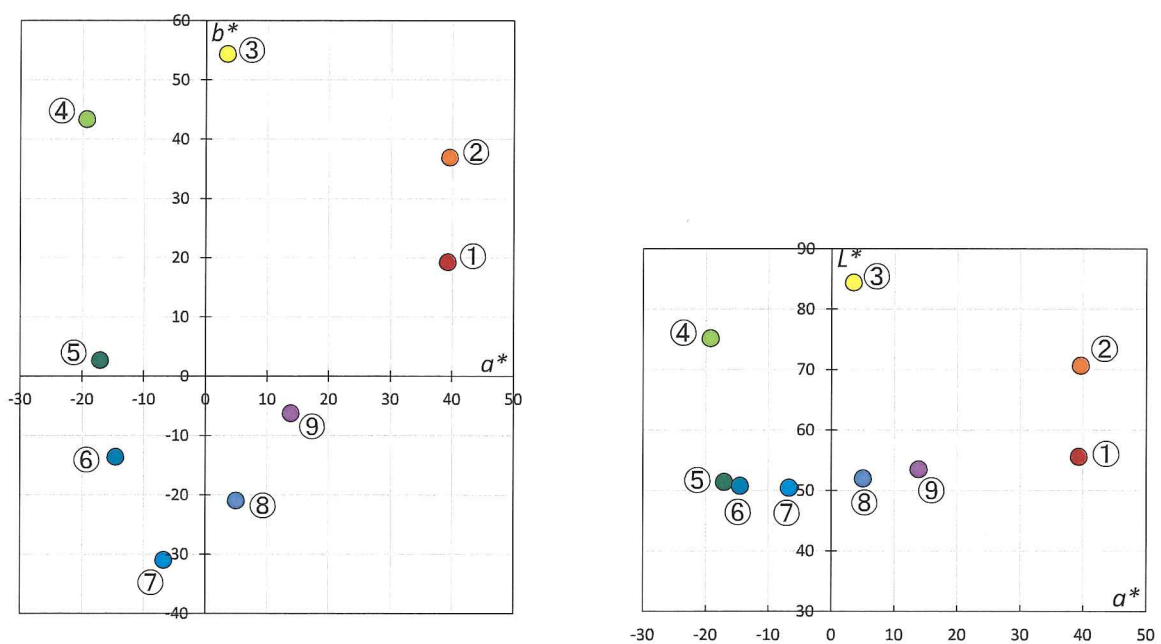


図 4-5 試験色 9 色の色彩特性 (FL-EDL で計算)

左 : a^*b^* 座標図 右 : L^*a^* 座標図

(c) CIECAM02 入力パラメータ

表 4-4 に CIECAM02 の入力パラメータを示す。X_w、Y_w、Z_w は順応白色であり、試料光源の相対三刺激値である。対象物の周囲は平均的な輝度⁴⁻¹³⁾とし、F、c、N_cの値を決定した。L_A (cd/m²) は順応視野輝度であり、ここでは照度を輝度に換算した値を採用し、1000 lx は 63.66、200 lx は 12.73、50 lx は 3.14、10 lx は 0.64 とした (表 4-5)。なお上記の入力パラメータに加え、各試験色の相対三刺激値 X、Y、Z を入力した。

表 4-4 CIECAM02 入力パラメータ

X _w	108.01
Y _w	100.00
Z _w	44.38
F	1.00
Y _b	20.00
c	0.69
N _c	1.00

表 4-5 照度に対する輝度の換算値

照度(lx)	L _A (cd/m ²)
1000	63.66
200	12.73
50	3.18
10	0.64

4.2.2 解析結果

CIECAM02 の h (色相角)、明るさ Q (ブライトネス)、鮮やかさ M (カラフルネス) と照度の関係を検討した。

照度と色相 (推定値) の関係を図 4-6 に示す。1000 lx から 10 lx まではどの色相においてもほぼ変化は見られない。

図 4-7 は、照度と明るさ (推定値) の関係であり、どの色相においても照度が低下することによって明るさが線形的に低下している。

照度と鮮やかさ (推定値) の関係は、図 4-8 に示すとおりどの色相においても照度の低下に伴って鮮やかさが低下している。また、赤色系の色相は鮮やかさが高く、青色系の色相は鮮やかさが低いなど、色相の違いによる鮮やかさの違いは照度が低下することによって相対的に低下している。

図 4-9 は、照度の変化に対する ambM 値の変化を示している。ambM 座標の原点は無彩色であり、原点から離れるほど鮮やかさが増すことを意味する。図 4-8 と同様に、照度低下に伴いすべての色相で ambM 値は原点方向へシフトしている。

以上の計算結果から、美術館・博物館用高演色形蛍光ランプも照度が増減することによって物体色の見えは大きく変わることが解析から明らかになった。

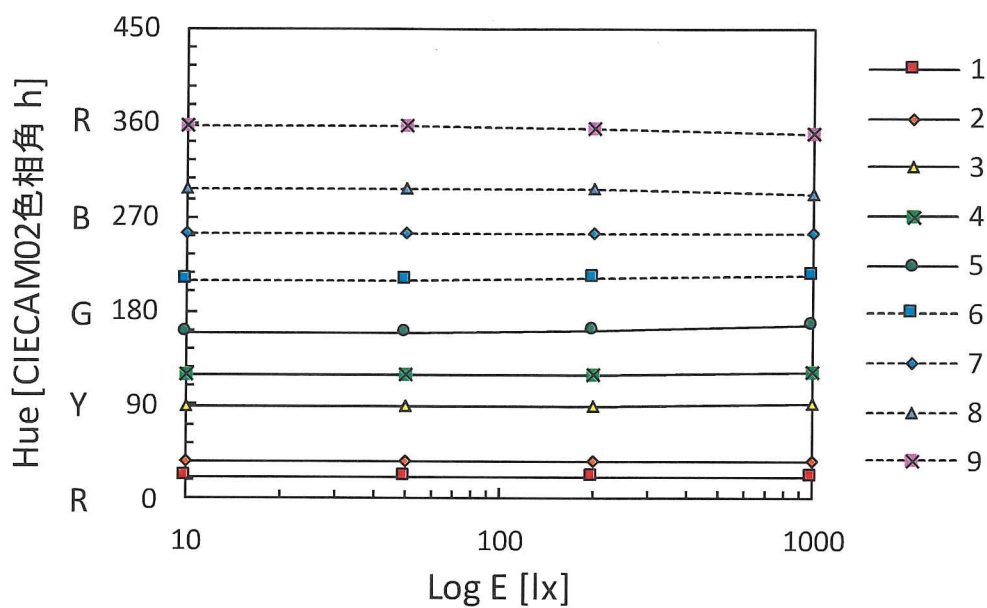


図 4-6 照度の変化と色相角 h (推定値) の関係 (FL-EDL)
1~9 は試験色の No.である。

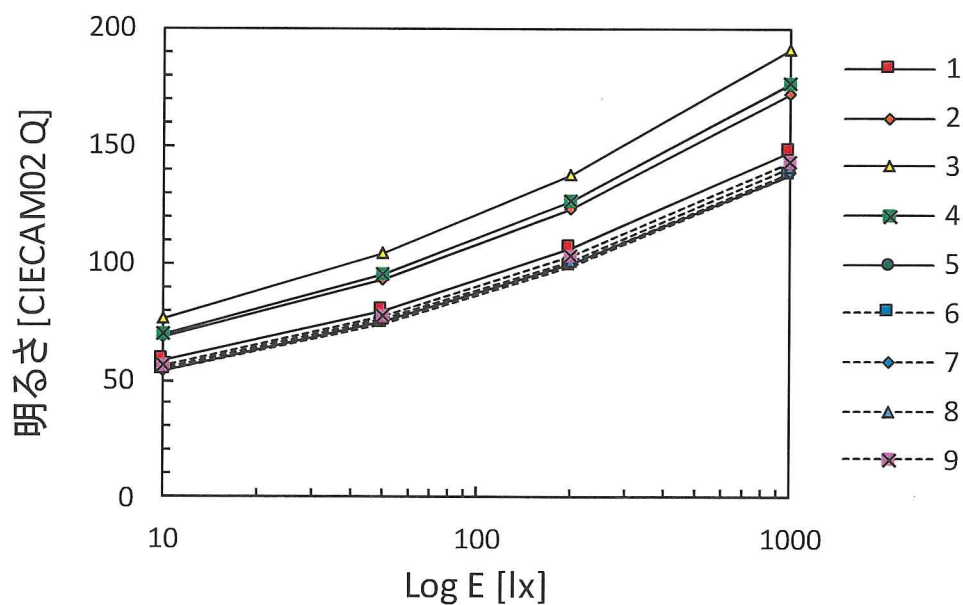


図 4-7 照度の変化と明るさ Q (推定値) の関係 (FL-EDL)
1~9 は試験色の No.である。

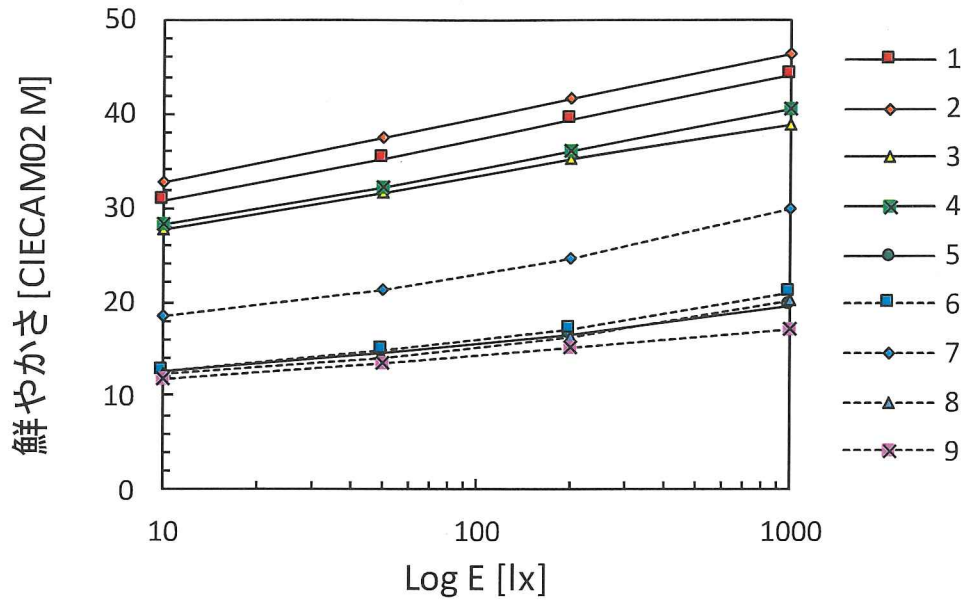


図 4-8 照度の変化と鮮やかさ M (推定値) の関係 (FL-EDL)
1~9 は試験色の No.である。

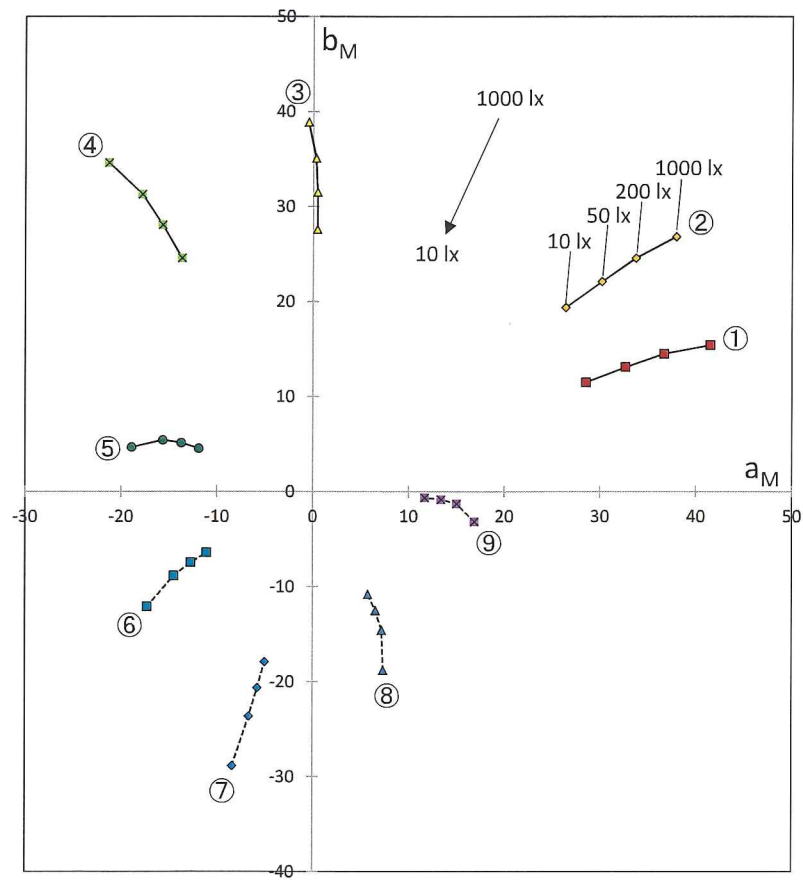


図 4-9 照度の変化に対する a_{MbM} 値の変化 (FL-EDL)
外側のシンボルから 1000、200、50、10 lx の a_{MbM} 値を示す。
①~⑨は試験色の No.である。

4.3 低照度下の色の見えの主観評価

美術館用高演色形蛍光ランプ照明について、照度を変化させたときの色の見えの変化を両眼隔壁法による等色実験により検討し、異なる照度下での色の見えが R_a 、 R_i で評価できるのかを確認する。

4.3.1 実験

(a) 実験方法

右眼で観察するテスト照明条件下の試験色に等色する色（対応色）^{注 2-1)} を左眼で観察する美術館・博物館用蛍光ランプ（パナソニック社製 FL20S・L-EDL・NU）1000 lx 下に置かれたマンセル色票（JIS 標準色票 光沢版【第 8 版（JIS Z 8721 準拠）】）の中から選択した（図 4-10）。

被験者は色彩評価に習熟した正常色覚の女性 2 名である。

(b) 評価観察ブース

実験に用いた評価観察ブースを図 4-11 に示す。ブース全体の大きさは奥行き 60.0 cm、横 90.0 cm、高さ 116.0 cm であり、暗室の机上に設置した。ブースは中央を隔壁で仕切り、左右それぞれのブース上部で点灯させたランプによって左右に異なる照度条件を設定した。ブース正面から向かって左側（左眼）を参照照明条件とし、右側（右眼）をテスト照明条件とした。ブース内部は隔壁を含め N6 無光沢色で覆い、さらに被験者からブース上部に設置した光源が直接見えないようブース正面上部を黒色紙で覆った。図 4-12 に N6 無光沢紙の分光反射率（コニカミノルタ社製分光測色計 CM-700d で 3 か所測定した平均値）を示す。

(c) 照明条件

参照側、テスト側ともに第 4.2.1 (a) と同様の光源 FL-EDL を用いた。照度はブース内の机上面照度とし、参照側 1000 lx 固定、テスト側を 1000 lx、200 lx、50 lx、10 lx に変化させた。照度調節は光源の分光分布が変化しないように黒色木綿ラシャ生地を遮光フィルター

注 2-1) 等色（対応色）：テスト照明条件下に置かれた試験色の見えの色と等しい見えの色となるように、基準照明条件下で試験色を選択する、直接色評価(direct color matching)する、調色可能なディスプレイ等の色を合わせるなどの手段で色を合わせること。

として使用し、重ねの枚数を増減することによって行った。また照度の微調整には筒状にした無光沢黒色紙を用い、直管蛍光ランプの発光面積を覆うことによって行い誤差は±1%以内とした。

(d) 試験色（観察対象物）

試験色は第 4.2.1 (b) と同様の 9 色相を用いた。

テスト側及び参照側の観察対象物に対する観察サイズを合わせるため、図 4-10 に示すように、マンセル色票（JIS 標準色票 光沢版【第 8 版（JIS Z 8721 準拠）】）と同等の大きさの開口（1.5 cm×2.0 cm）を有する N6 無光沢マスク（15.0 cm×21.0 cm）で試験色を覆い、開口部から色が覗けるようにした。

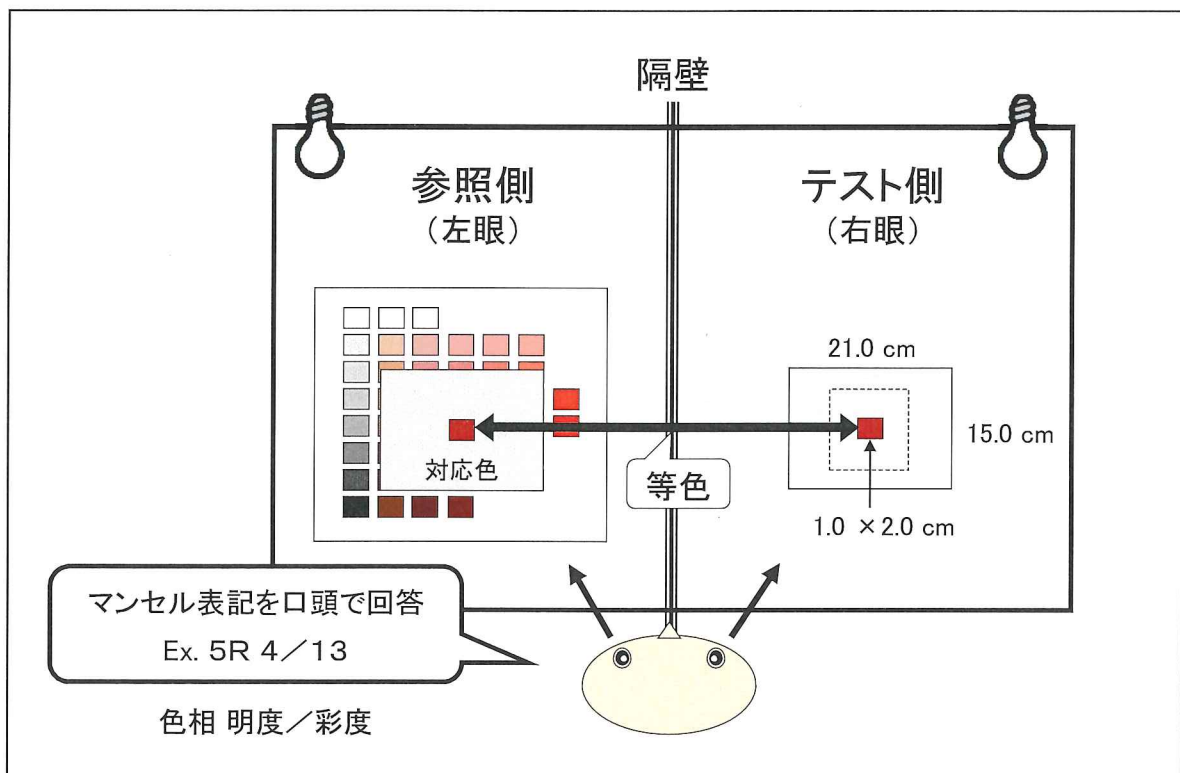
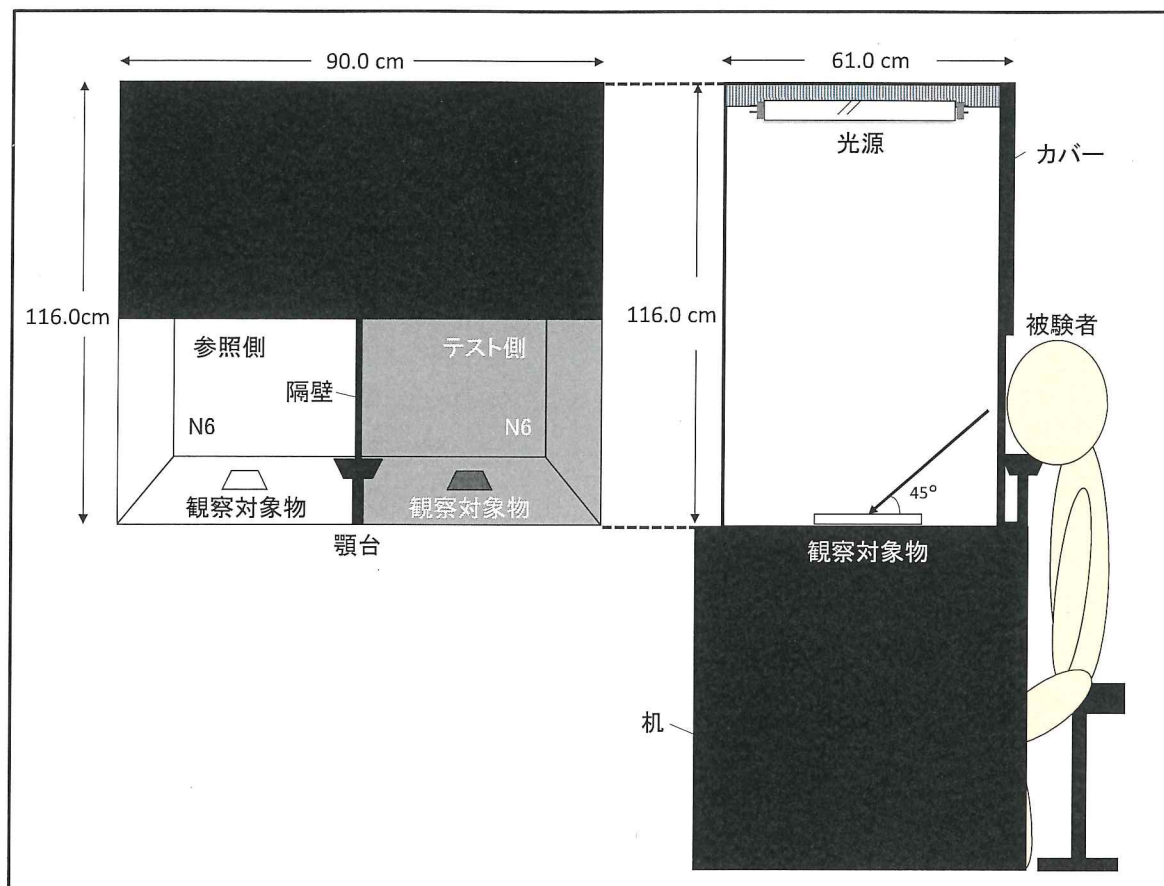
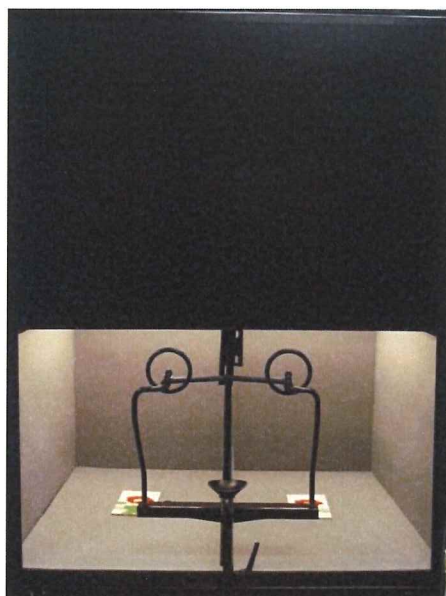


図 4-10 等色実験



(a) 評価観察ブース 左：正面図、右：立面図



(b) 評価観察ブース



(c) ブース上部（蛍光ランプ）

図 4-11 評価観察ブース

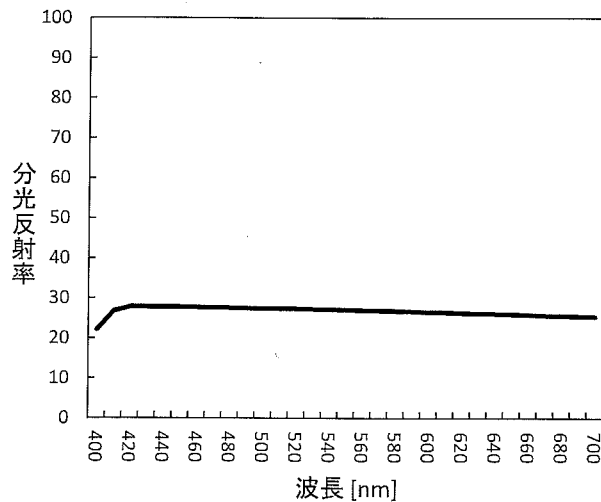


図 4-12 N6 無光沢色の分光反射率（3 点測定の平均値）

(e) 実験手順及び教示

実験手順は以下の通りである。

- ① 被験者は暗室に入室後、実験に関する教示を受ける。教示を含め、約 5 分間の暗順応を行う。
- ② 被験者は実験ブースの中央に着座し、顎台で頭部を固定する。左右の照明条件に対して両眼を 1 分から 3 分間順応させる。
- ③ 実験者が参照条件（左）のブースにマンセル色票を、テスト条件（右）のブースの中央に試験色を配置する。このとき、試験色はランダムな順序とする。
- ④ 被験者は左右のそれぞれの眼でマンセル色票及び試験色を斜め上から約 45° の角度で観察し、テスト条件下での色の見えと同等の見えの色をマンセル色票の中から選択する。このとき、内挿値、外挿値も許した。被験者は試験色には触れられないが、マンセル色票は自由に触ることができる。等色には必ずマスクを使用するものとした。
- ⑤ 被験者は等色が終わると、そのマンセル値（H V/C）を口頭で答え、実験者が紙に記録する。その後、実験者は次の試験色に取り替える。
- ⑥ すべての試験色の等色が終了すると、被験者は実験ブースから離れて待機し、実験者が照度を変更した後、再び①からの手順を繰り返す。

①から⑥までの流れを1セッションとし、被験者は4セッション（ランプ1種類×照度4種類＝4）を、日を変え3回評価した。照度の変化については、10 lx から 1000 lx へ変化させる昇順と 1000 lx から 10 lx へ変化させる降順の2パターンとし、たとえば被験者 YN の場合、1回目昇順、2回目降順、3回目昇順といったようにランダムに振り分けた。なお昇順の場合は照度の変更ごとに1分の順応時間を、降順の場合は3分の順応時間を設けた。

被験者には以下の教示に基づいて評価させた。

「右ブースに置かれた試験色と同じに見える色を、左ブースの色票集の中から探し、マンセル表記 H V/C の順に答えてください。色票集には自由に触れて良いですが、試験色には触れないようにお願いします。また、色票集の色と試験色の色を比較する際は必ずマスクを用いてください。色票集の中に一致する色が見つからなかった場合は、色票と色票の間、色票の外側の色を答えてくださって結構です」。

4.3.2 結果及び考察

被験者ごとの等色結果には若干のばらつきがあったが傾向は類似していたため3回繰り返しのデータの平均値を各被験者の等色結果として扱うこととした。

被験者 YN 及び被験者 RH の各照度下の等色結果（マンセル値）を表 4-6 (a)、(b) に示す。マンセル値は H V/C（色相 H、明度 V、クロマ C）で表記する。表 4-6 (a)、(b) から明らかなように、照度が低下するにつれて等色した対応色の明度、クロマは低下し、色相も変化していることがわかる。

各照度下での等色結果を測色的に解析するため、色の見えの心理知覚量と対応するメトリック量^{注2-2)}を算出した。メトリック量算出の手順は以下の通りである。等色したマンセル色票 (HV/C) の色度座標 (x , y , Y) を JIS Z8721（色の表示方法—三属性による表示）⁴⁻¹⁴⁾ から求め、その値から三刺激値を計算した。次に側垣らによる任意のマンセル値から分光反射率を推定する方法^{4-15) ~ 4-17)}を用いて、対応色の分光反射率を推定した。推定した分光反射率を用いて参照光源である FL-EDL 下での $L^*a^*b^*$ 、メトリッククロマ C^*_{ab} 、メトリック色相角 h_{ab} を算出し、測色解析を行った。なお各測色値を算出する際は、CIE 1964

注 2-2) メトリック量：色の見えの心理知覚量と関連する心理測定量の総称。

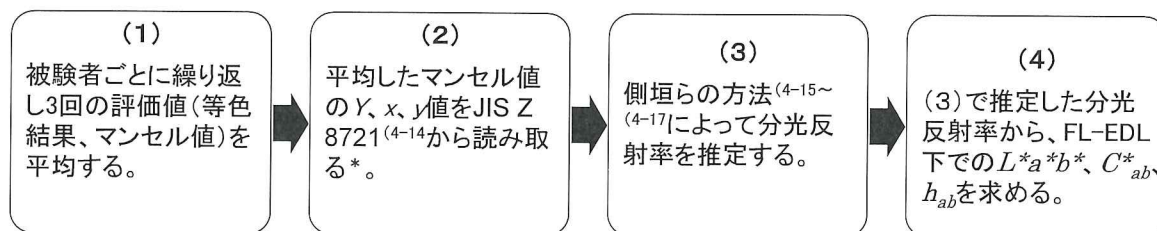
表 4-6 各照度下における等色結果（マンセル値）

(a) 被験者 YN の結果

試験色No.	1000 lx	200 lx	50 lx	10 lx
1	5R 4/13	2.5R 4/10	1.7R 4/8	6.7R 3/6
2	10R 7/12	10R 6/11	5R 6/8	6.7R 6/7
3	0.8Y 8/12	0.8Y 8/10	5.8YR 8/7	5.8YR 8/4
4	5GY 8/10	5GY 8/9	5GY 8/5	9.2GY 7/2
5	2.5G 4/7	5.8G 4/5	10G 4/4	1.7BG 4/3
6	5BG 5/6	6.7BG 4/4	8.3BG 4/4	5BG 3/4
7	1.7PB 4/8	10B 5/5	8.3B 4/4	6.7BG 3/3
8	10PB 5/4	10PB 4/4	8.3PB 4/3	7.5PB 3/2
9	2.5RP 4/5	1.7RP 4/4	1.7RP 4/4	0.8R 3/3

(b) 被験者 RH の結果

試験色No.	1000 lx	200 lx	50 lx	10 lx
1	4.2R 5/13	8.3R 4/11	9.2RP 3/9	7.5RP 3/7
2	1.7YR 6/13	0.8YR 6/10	10R 5/10	10R 6/8
3	2.5Y 8/14	10YR 8/10	6.7YR 7/7	3.4YR 7/5
4	4.2GY 7/12	2.5GY 7/8	4.2GY 7/6	5.8GY 7/3
5	4.2G 4/8	2.5G 4/5	7.5G 3/4	5.8BG 3/2
6	7.5BG 4/7	7.5BG 4/4	9.2BG 3/4	10BG 3/3
7	2.5PB 4/10	0.8PB 3/6	0.8PB 4/5	0.8PB 3/3
8	10PB 4/9	10PB 4/5	10PB 3/5	10PB 3/3
9	10P 4/6	10P 4/5	10P 3/4	10P 3/3



* : JIS Z 8721⁽⁴⁻¹⁴⁾にないマンセル値は、表にある数値から補間して算出
 例) 5B 5/9のx、y値を求める場合、5B 5/10および5B 5/8のx、y値から補間

図 4-13 等色結果に対する各測色値の計算手順

標準観測者（10度視野）の等色関数（ $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ ）を用いた。各測色値の計算手順を図4-13に示す。なお色の見えの心理知覚量と対応するメトリック量であるメトリッククロマ C^*_{ab} は（4-1）式、メトリック色相角 h_{ab} は（4-2）式によって算出した。

$$C^*_{ab} = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \dots\dots\dots (4-1)$$

$$h_{ab} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \dots\dots\dots (4-2)$$

図4-14は、照度とメトリック色相角 h_{ab} （対応色）との関係を示している。色相角 0° は赤色方向、 90° は黄色方向、 180° は緑色方向、 270° は青色方向をそれぞれ表している。被験者 YN と被験者 RH の結果は概ね一致しており、1000 lx から 50 lx まではどの色相においても変化は見られないが、10 lx ではいくつかの色相で変化が見られた。No.5 の緑色及び No.7 の青色の場合、10 lx では No.6 の青緑とほぼ同等の色相角となり、それぞれ青緑方向へ色相がシフトしている。低照度下において緑みの色相が青色の方向へシフトするのは、既往研究の結果とも一致している（4-18）～（4-19）。また被験者 YN については No.9 の赤紫にも 10 lx での赤色方向への色相のシフトが見られた。No.1 の赤色、No.3 の黄色、No.4 の緑色、No.8 の紫色については、照度に関係なくほぼ一定の色相を保っていた。

図4-15は、照度とメトリック明度 L^* （対応色）の関係を示している。 L^* の結果も被験者 YN と被験者 RH の結果は概ね一致しており、照度低下による L^* の低下は僅かであった。これは等色実験の応答として明度指数マンセル V（バリュー）を用いたことに起因すると考えられる。すなわち、被験者は照度の影響を受けるブライトネス（主観的な明るさ）ではなく反射率で決まる明度で評価したため、照度の影響を僅かにしか受けなかったと考えられる。

図4-16は、照度とメトリッククロマ C^*_{ab} （対応色）との関係を示す。 C^*_{ab} も被験者 YN と被験者 RH の結果は概ね一致し、照度が低下することによって多くの色相で C^*_{ab} が低下、すなわち照度の低下に伴って鮮やかさが低下していることを意味する。特に 1000 lx で高彩度に知覚されていた赤色（No.1）、橙色（No.2）、黄色（No.3）は照度変化の影響を大きく受け、10 lx では 1000 lx のおおよそ半値にまで鮮やかさが低下している。一方、1000 lx で低～中程度の鮮やかさに知覚されていた青色（No.6）、紫色（No.8）、赤紫色（No.9）は、照度による影響が小さく、照度が低下しても鮮やかさの低下がわずかである。

照度低下に伴う鮮やかさの変化を図4-17に示す。被験者 YN、被験者 RH ともに、照度が

低下することによって等色した対応色の座標値は原点方向へ移動しており、照度低下によって知覚的な鮮やかさが低下していることを示している。照度の低下に伴って知覚的な鮮やかさが低下するのは、既往研究の結果とも一致している 4-1)、4-18) ~4-19)。

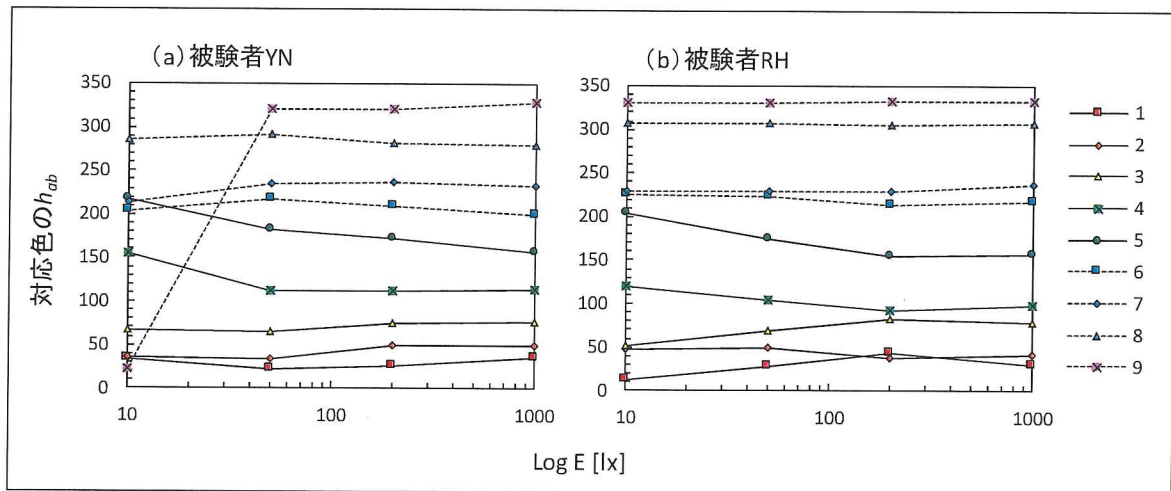


図 4-14 照度の変化とメトリック色相角 h_{ab} (対応色) との関係 (FL-EDL で算出)

左：被験者 YN の結果、右：被験者 RH の結果

縦軸：対応色の h_{ab} 、横軸：照度 (1000 lx、200 lx、50 lx、10 lx)

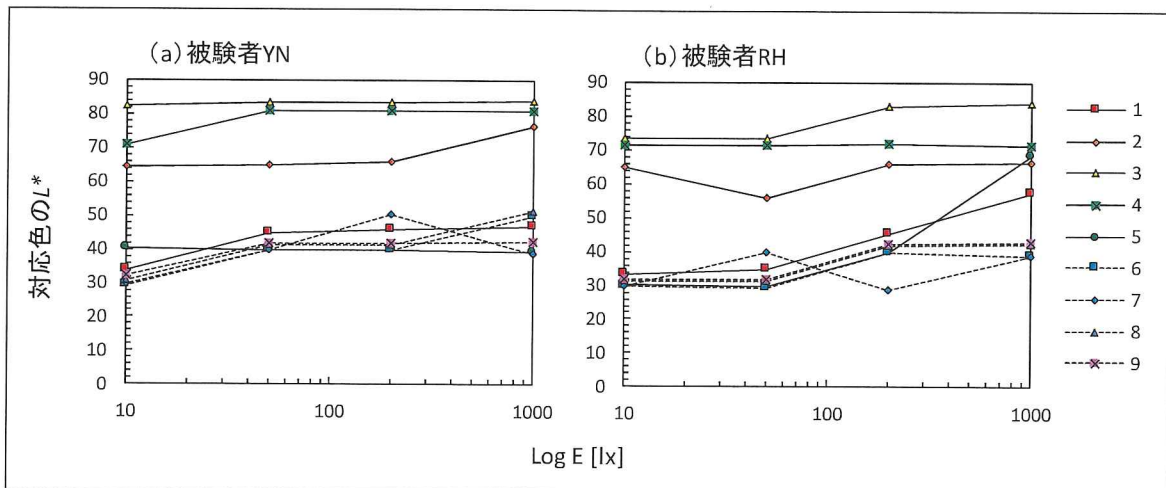


図 4-15 照度の変化とメトリック明度 L^* (対応色) との関係 (FL-EDL で算出)

左：被験者 YN の結果、右：被験者 RH の結果

縦軸：対応色の L^* 、横軸：照度 (1000 lx、200 lx、50 lx、10 lx)

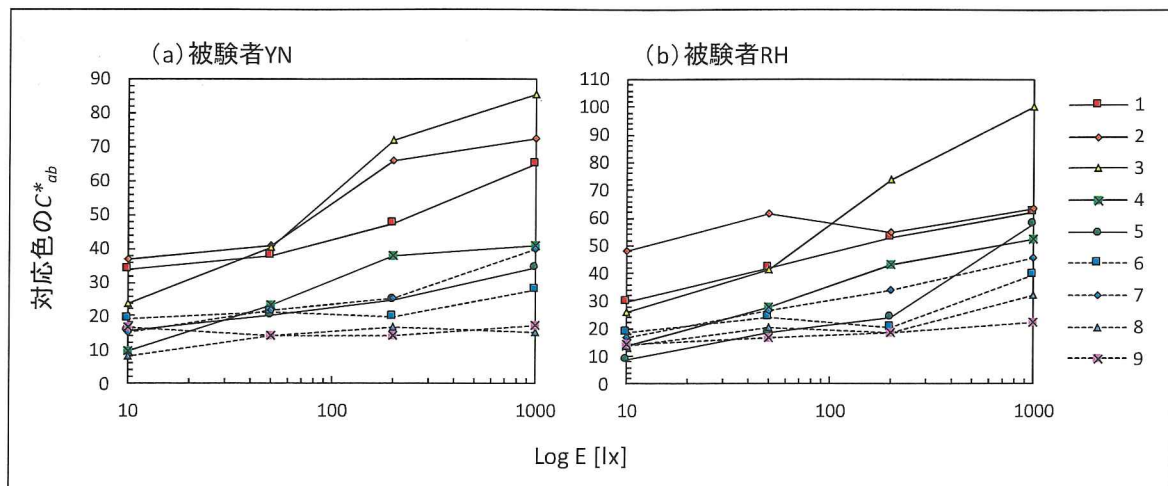


図 4-16 照度の変化とメトリッククロマ C^*_{ab} (対応色) との関係 (FL-EDL で算出)

左：被験者 YN の結果、右：被験者 RH の結果

縦軸：対応色の C^*_{ab} 、横軸：照度 (1000 lx、200 lx、50 lx、10 lx)

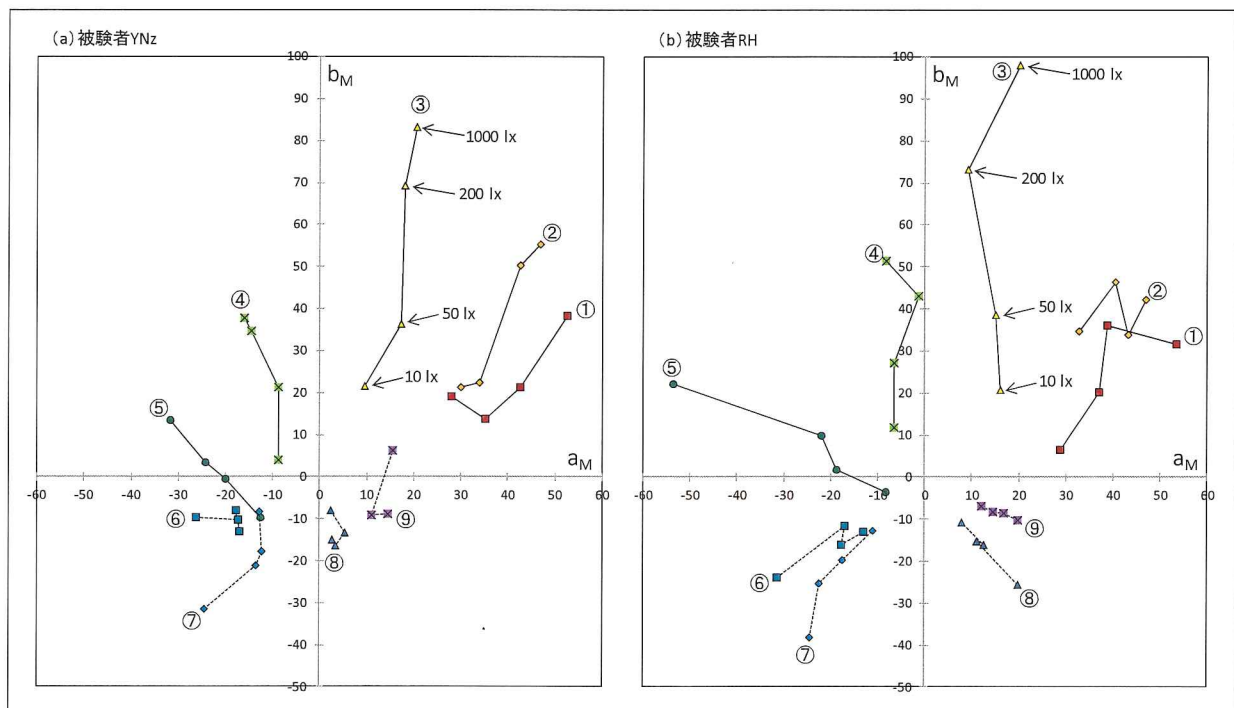


図 4-17 照度低下に伴う a^*b^* クロマ座標値の変化 (FL-EDL で算出)

左：被験者 YN の結果、右：被験者 RH の結果

照度：1000 lx、200 lx、50 lx、10 lx

4.4 結論

本章では美術館用高演色形蛍光ランプ (FL-EDL、 Ra 96) 下の色の見えが照度でどのように変化するかを測色解析、及び主観評価実験により検討し、異なる照度下での色の見えが Ra 、 Ri で評価できるのかを検証した。本章で得られた結果を以下にまとめる。

1. 測色解析及び主観評価の結果から、 Ra 96 の高演色形ランプであっても照度が低下すると有彩色物体の見えの鮮やかさは低下することが明らかになった。これは現行 CIE/JIS 演色評価方法による平均演色評価数 Ra 96 を有する高演色ランプであっても、照度が変わると Ra 96 という高演色性（色の忠実性）は保証されないことを意味している。
2. 低照度が強いられる美術館照明の演色性を正しく表現するためには Ra は不十分である。すなわち、美術館照明の演色性を正しく表現するためには、現行演色性評価方法（色の忠実性）に替わる新しい演色性評価の考え方が必要である。

次章では、美術館照明の演色性評価として“色の忠実性”に替わる評価方法として“色彩印象”の評価方法に着目し、分光分布及び照度が異なる照明下における2色配色の色彩印象を評価する。

第 5 章

分光分布及び照度が異なる照明下における

色彩印象評価

第5章 分光分布及び照度が異なる照明下における色彩印象評価

5.1 はじめに

前章の等色実験の結果から、たとえ高い Ra 値を有する高演色形ランプであっても照度が低下することによって色の見かけの明るさ、鮮やかさが低下し、一部の色においては色相が変化することが明らかになった。すなわち照度に関係なく数値が一定の Ra では照度が低下したときの色の見えを表すことができず、美術館照明を評価する演色性評価方法として十分ではない。

現行の演色性評価方法に採用されている“色の忠実性”では低照度下の演色性を評価できないとするならば、美術館照明はどのような考え方で評価できるのであろうか。

図 5-1 に演色性研究で主に用いられる色の評価方法を示す。演色性研究における色の評価方法は主に“色の見えの評価方法”と“色彩印象の評価方法”に大別できる。色の見えの評価方法は、色差や色の弁別域など見えそのもののある目盛りによって定量的に評価するものであり、実験方法としては第4章で実施した等色法などが挙げられる。すなわち“色の忠実性”も色の見えの評価方法に相当する。色彩印象の評価方法は、見かけの色の好ましさや明るさなどより高次の心理的な感情効果を言葉に置き換えて評価し、さらに被験者の応答を数値化することで人々が抱くイメージの平均像を得るものであり^{5.1)}、実験方法としては SD 法 (semantic differential technique) などが挙げられる。

本章では美術館照明の演色性評価として“色彩印象の評価方法”が有効であるか否かを検討するために、分光分布及び照度が異なる照明下における2色配色の色彩印象を SD 法によって評価し、分光分布及び照度が色彩印象に対してどのように影響しているのかを検証した。

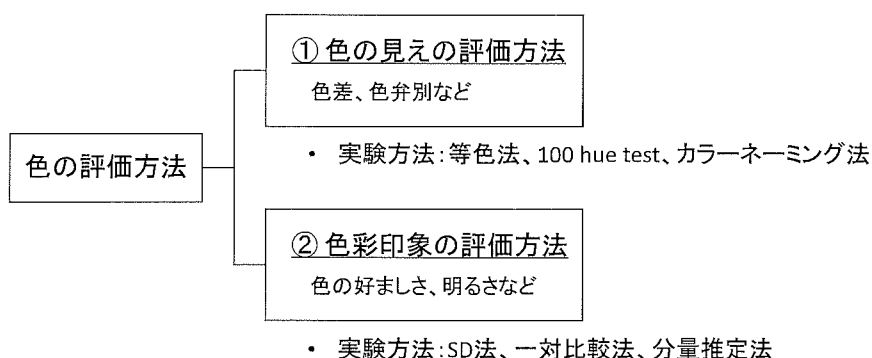


図 5-1 演色性研究で主に用いられる色の評価方法

5.2 2色配色に対する色彩印象評価

色に対する人間の感情が、単色の場合と配色された場合とで差異を生ずることはすでによく知られている⁵⁻²⁾。単色及び配色の色彩印象研究においては納谷らの実験が挙げられる。納谷らは、単色に対する感情効果⁵⁻³⁾～⁵⁻⁴⁾、2色配色に対する感情効果⁵⁻⁵⁾、3色配色に対する感情効果⁵⁻⁶⁾～⁵⁻⁸⁾をそれぞれ主観評価実験及び多変量解析により検討し、感情効果の主要な因子を推定する式を求めた。辻本らはこれらの結果を整理し、単色の感情は配色の感情に比べて感情の動きが鈍ること、“はなやかさ”、“暖かさ”の感情は単色の感情の合計で求められるが、“こころよさ”、“目立ち”の感情は単色の感情の合計では定まらないことを示している⁵⁻²⁾。

演色性に関する研究においては一般的に住宅リビング空間やオフィス空間を想定し、日常的に目にするようなさまざまな色を配置した有彩色物体群を評価対象とする場合が多い。しかしこの場合、観察対象物の色の影響を検証するのは困難である。橋本らの一連の研究では、2色配色⁵⁻⁹⁾、⁵⁻¹⁰⁾及び4色配色、8色配色⁵⁻¹¹⁾を用いて、光源の演色性の変化に対する有彩色物体群から受ける“明るさ感”の変化の成因を検討している。その結果、配色間から受ける“くっきり”、“はっきり”というような2色配色の“目立ち感情”によって“明るさ感”が評価でき、この“くっきり”、“はっきり”と言った感情は単色よりも配色を用いることによって容易に評価できると述べている⁵⁻⁹⁾。また、8色配色は色数が多すぎるため、8色を一様に見て判断することが困難であり、赤色、黄色、緑色、青色からなる4色配色が最も目立ち感情の変化を効果的に評価できるとも述べている⁵⁻¹¹⁾。

2色配色をはじめとする数色からなる配色の色彩印象評価及びその評価構造については、配色感情研究及び演色性研究においてすでに膨大に研究されている⁵⁻²⁻⁵⁻¹¹⁾。しかし、分光分布及び照度が異なる照明下における2色配色の色彩印象評価はこれまでに検討されておらず、分光分布及び照度が色彩印象評価に対してどのように影響するのかは明らかになっていない。

美術作品の多くは複雑な多色配色からなり、ある光源で照明されたときの美術作品全体から受ける色の印象は、対比や同化などといった視覚要素が複雑に影響し合っていると推測できる。美術館照明を評価するには実際の絵を評価対象とするのが望ましいが、絵は描かれる対象や色の組み合わせ、画材など評価に影響しうる要素が多く、要素が多くなればなるほど影響要因を取り出すことが困難となる。本章では分光分布及び照度が異なる照明下における色彩印象評価の評価傾向を検討することを目的とし、観察対象物の影響要因を配色構成色の影響のみに統制するために、最も単純な2色配色を用いて異なる照明下における2色配色の

色彩印象評価実験を行った。

5.2.1 実験

(a) 実験方法

美術館用の高演色形蛍光ランプ 700 lx 下での観察対象物の色彩印象を基準に、テスト照明条件下の観察対象物の色彩印象を両眼隔壁法によって比較評価した。被験者は正常色覚の女性 3 名（25 歳～29 歳）である。3 名はともに色彩評価に習熟した学生である。眼鏡及びコンタクトレンズの使用制限は特に行わなかったが、日常的に視力矯正している被験者についてはその状態で実験に参加するよう教示した。

(b) 評価観察ブース

実験に用いた評価観察ブースを図 5-2 に示す。ブースの大きさは奥行き 60.0 cm、横 90.0 cm、高さ 116.0 cm であり、暗室内に設置した。ブースは中央を隔壁で仕切ることによって左右ブース上部に点灯するランプで左右異なる照明条件を設定した。ブースの内面は隔壁を含めて N6 無光沢紙で覆った。

(c) 評価形容詞対

実験に用いた評価形容詞対を図 5-3 に示す。評価形容詞対は、遠藤の研究⁵⁻¹²⁾で用いられた形容詞対の中から、照度の影響が特に顕著であることが示された“派手な—地味な”、“澄んだ—濁った”、“動的な—静的な”、“明るい—暗い”、“美しい—汚い”、“快適な—不快な”の計 6 種類とした。この 6 種類は納谷らの配色調和研究⁵⁻⁴⁾においても用いられている。なお“美しい—汚い”、“快適な—不快な”は、遠藤の研究⁵⁻⁹⁾では“美しい—醜い”、“快い—不快な”であったが、納谷らの配色調和研究⁵⁻⁴⁾で用いられた評価形容詞対との整合性を取るために“美しい—汚い”、“快適な—不快な”とした。

評価尺度は図 5-3 に示すように「どちらでもない」を中心に両極に「非常に」「かなり」「やや」を配置した 7 段階評定とした。

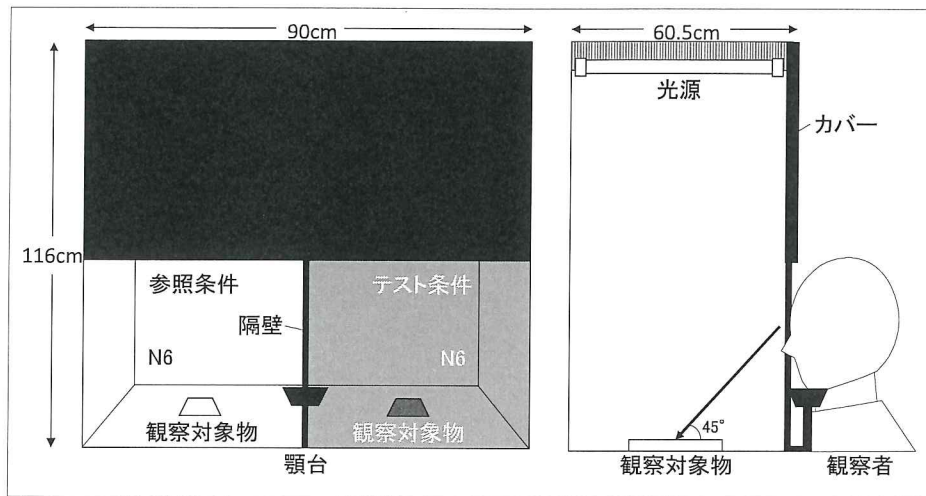


図 5-2 評価観察ブース

		非常に -3	かなり -2	やや -1	どちらでもない 0	やや +1	かなり +2	非常に +3	
No.1	地味な								派手な
No.2	濁った								澄んだ
No.3	静的な								動的な
No.4	暗い								明るい
No.5	汚い								美しい
No.6	不快な								快適な

図 5-3 実験に用いた評価形容詞対（6 種類）および 7 段階尺度

(e) 観察対象物

実験に用いた2色配色は、納谷、橋本の実験^{5.9) ~ 5.10)}で用いられた40対の2色配色の中から、構成色の片側が無彩色の配色対を除いた24対(光沢色)である。なお、橋本らが用いた40対の2色配色は、辻本らの実験^{5.2)}で用いられたサンプルから選定した40対である。辻本らの2色配色に選定方法は、マンセル標準色票(IV)より、40色相の各色相面からランダムに計200色を選出し、それらをさらにランダムに2色ずつ組み合わせた計100対の2色配色からサンプルを選定するといものである。

2色配色は横4.0 cm×縦6.0 cmの単色の色票を隣接して並置したもので、全体の大きさは横8.0 cm×縦6.0 cmである。2色配色を図5-4に示し、そのマンセル値を表5-1に示す。



図 5-4 2色配色 (24 対)

表 5-1 2色配色（24 対）のマンセル値

No.	マンセル値		No.	マンセル値	
1	5Y8/9	5YR5/7	13	10Y8/10	10PB3/10
2	2.5G4.5/8	5PB3/7	14	7.5YR6/5	5B4/5
3	2.5PB5/10	2.5P4.5/10	15	2.5PB4.5/10	5BG4.5/8
4	5BG7/7	2.5PB7/5	16	2.5RP9/2.6	5RP3.5/13
5	5B6.5/8	5PB3/7	17	2.5RP9/2.6	2.5RP3/10
6	2.5Y8/9	5BG5/6	18	5GY9/4	7.5GY7/4
7	7.5BG3/4	2.5RP3/10	19	5RP6/6	7.5PB4.5/6
8	2.5G6/8	5RP6/6	20	5GY6/7	10R5/11
9	10Y9/7	5BG3/4	21	10P9/2.8	7.5B6/8
10	7.5BG4/7	2.5R5/12	22	2.5PB7/5	7.5YR7/4
11	5GY9/4	10RP3/8	23	5R5/12	5PB3.5/11.7
12	10R6/11	2.5PB6.5/8	24	2.5Y9/4	5PB3/7

(d) 照明条件

実験に用いた光源の相対分光分布を図 5-5 に示し、特性値（相関色温度、 R_a 、 R_g 、色度 xy 、偏差 Duv ）を表 5-2 に示す。照明条件を表 5-3 に示す。光色は照度規制の厳しい日本画展示照明を想定し、電球色に設定した。参照光源は美術館用の高演色形蛍光ランプ（FL-EDL）1 種類である。テスト光源は LED ランプ 2 種類（RGB3 色 LED 混光タイプ：LED-RGB、青色 LED 励起黄色蛍光体タイプ：LED-BY）、蛍光ランプ 1 種類（一般型蛍光ランプ：FL-WW）である。なお LED-RGB は 3 色の単色 LED（赤色、緑色、青色）を組み合わせることによって様々な分光分布が実現できる LED 照明装置を用いた（図 5-6）。この装置は単色 LED の分光分布を組み合わせ、各 LED の強度を調節することによって異なる分光分布を合成することができる。LED 照明装置の照明特性を図 5-7 に示す。

照度の調整は光源の分光分布が変化しないように黒色木綿ラシャ生地を遮光フィルターとして使用し、重ねの枚数を増減することによって行った。照度はブース机上面の水平面照度とし、高照度（700 lx）、中照度（200 lx）、低照度（50 lx、10 lx）の 4 段階に設定した。参照光源の照度は 700 lx 固定とした。照度の選定理由としては、700 lx は JIS「表面色の視感比較方法⁵⁻¹³⁾」で規定された観察照度（原則として 1000 lx 以上）を考慮したものであり、LED 照明装置で実現できる最大照度値を用いた。200 lx は Loe ら⁵⁻¹⁴⁾の実験結果における油彩画、水彩画の好ましい展示照度を考慮したもの、50 lx は CIE 技術報告書 No.157⁵⁻¹⁵⁾における日本画展示推奨照度を考慮したもの、10 lx は第 3 章の調査結果から実際の美術館で設定される照度の最低値を参考として採用した。照明条件を変化させた場合はその都度測定を行い、照度誤差は±1%以内とした。

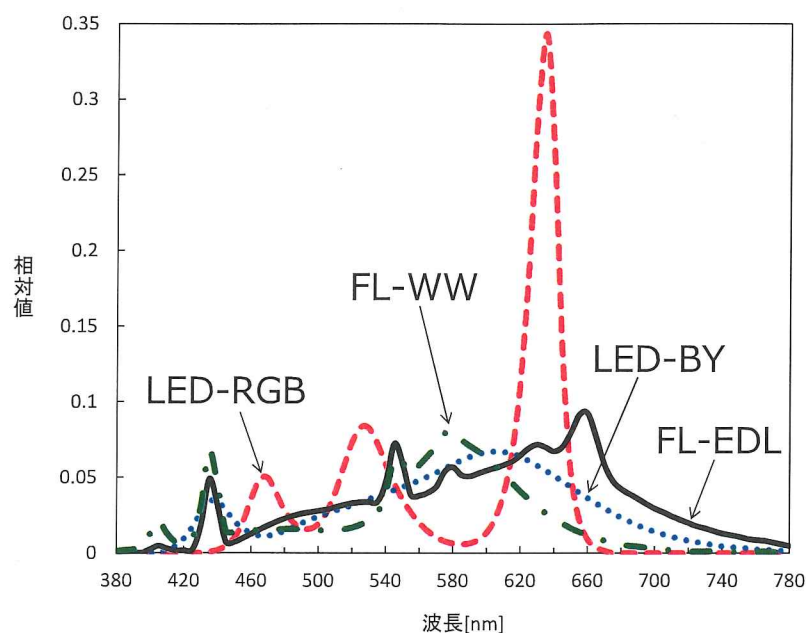


図 5-5 用いた光源の分光分布（同一照度で正規化）

表 5-2 用いた光源の特性値（相関色温度、 R_a 、 R_g 、色度 xy 、偏差 Duv ）

(CL-500Aによる測定値)								
光源	略称	CCT	R_a	R_g	x	y	Duv	
参照光源 高演色形蛍光ランプ	FL-EDL	3060	96	95	0.435	0.407	0.0018	
青色LED＋黄色蛍光体タイプ	LED-BY	3060	84	19	0.430	0.397	-0.0017	
テスト光源 一般形蛍光ランプ	FL-WW	3460	55	-110	0.411	0.401	0.0030	
赤-緑-青3色タイプ	LED-RGB	3050	21	-172	0.457	0.389	-0.0066	

表 5-3 照明条件

条件	参照光源		テスト光源		実験条件名
1	700 lx	FL-EDL	700lx	LED-BY	BY700
2				FL-WW	WW700
3				LED-RGB	RGB700
4			200lx	LED-BY	BY200
5				FL-WW	WW200
6				LED-RGB	RGB200
7			50lx	LED-BY	BY50
8				FL-WW	WW50
9				LED-RGB	RGB50
10			10lx	LED-BY	BY10
11				FL-WW	WW10
12				LED-RGB	RGB10

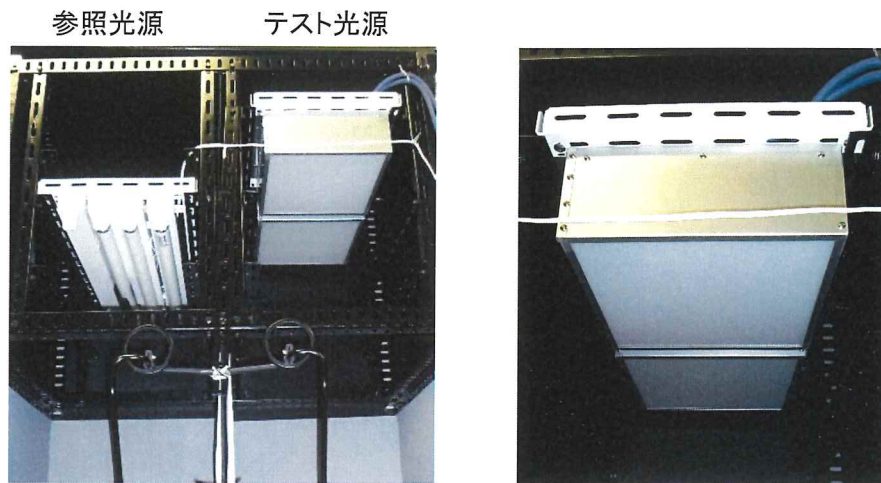


図 5-6 LED 照明装置

左：ブース上部 右：LED 照明装置を斜め下から撮影

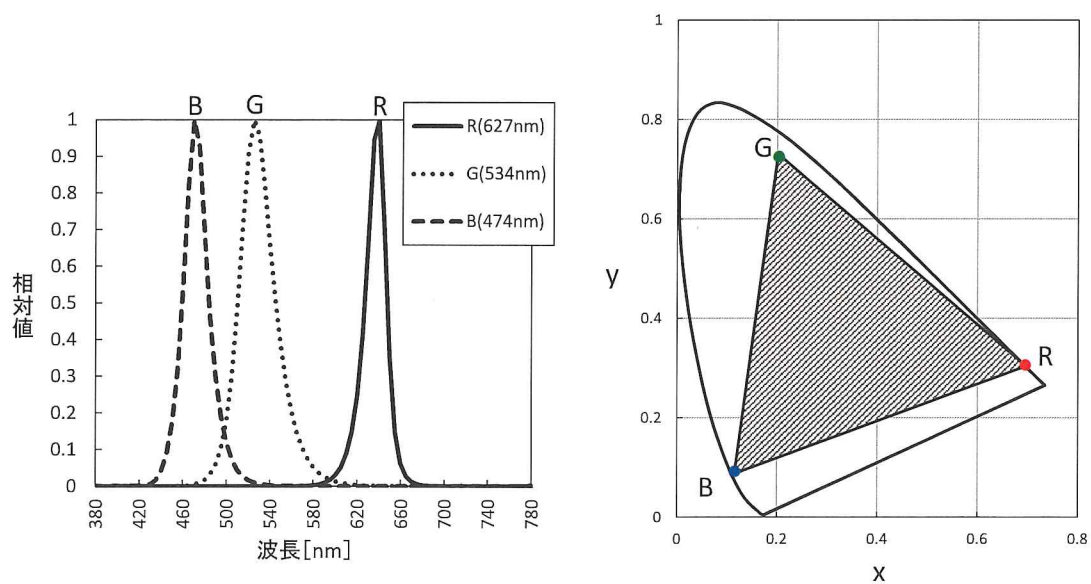


図 5-7 LED 照明装置（赤色、緑色、青色 LED）の照明特性

左：赤色、緑色、青色 LED ランプの分光分布
右：赤色、緑色、青色 LED ランプの xy 色度図上の色域

(f) 実験手順と教示

実験手順は以下の通りである。

- ① 被験者は暗室に入室後、実験に関する教示を受ける。教示を含め、約5分間の暗順応を行う。
- ② 被験者は実験ブースの中央に着座し、顎台で頭部を固定する。左右の照明条件に対してそれぞれの目を1分から3分間順応させる。
- ③ 実験者が左右のブースの中央に同一の観察対象物を配置する。
- ④ 被験者は左右のそれぞれの眼で観察対象物を斜め上45°の位置から観察し、実験者が読み上げた評価項目に対して口頭で回答する。回答はすべて実験者が用紙に記録する。
- ⑤ すべての観察対象物の評価が終了すると被験者は実験ブースから離れて待機し、実験者が照度ないしランプを変更した後、再び①からの手順を繰り返す。

①から⑤を1セッションとする。各被験者は全12セッション（ランプ3種類×照度4種類＝12照明条件）を、4セッションごとに3日にわけて評価した。1セッション内の照明条件の変化は照度の変化のみとし、このときの照度変化は降順700 lx→200 lx→50 lx→10 lx、あるいは昇順10 lx→50 lx→200 lx→700 lxのどちらかを割り当てた。たとえば被験者YNの例を示すと、1日目はLED-RGBについて降順700 lx→200 lx→50 lx→10 lx、2日目はLED-BYについて昇順10 lx→50 lx→200 lx→700 lx、3日目はFL-WWについて昇順10 lx→50 lx→200 lx→700 lxであった。

実験時間は1セッション約30～40分であり、4セッションの合計所要時間は最低2時間15分、最高3時間であった。被験者の負担を考慮してセッション間には約5分程度の休憩を設けた。

被験者には美術館照明を想定した印象評価実験であることを事前に示し、以下の教示に基づいて評価させた。

「左ブースのサンプルの印象と比較して、右ブースのサンプルの印象がどう見えるかを評価してください。評価の際はサンプルのどこを観察していただいても構いません。2色配色全体から受ける色の印象を答えるようにしてください。正しい答えがあるわけではありません。見たまま、感じたままに直感で答えてください」。

5.2.2 結果及び考察

(a) 主観評価値に対する分光分布、照度の影響

2色配色に対する光源、照度の影響を確認するために、各照明条件に対する主観評価値（被験者3人の全平均）を算出した。なお主観評価値は7段階尺度が等間隔であるとみなし、被験者の応答を+3～-3に数値化して求めた。表5-4は各照明下の2色配色24対の全平均及び標準偏差である。図5-9は表5-4に基づいて作成した各照明下の主観評価プロフィールである。表5-4、図5-9に示すように、どの照度レベルにおいてもLED・RGBの主観評価値は他のランプの主観評価値より高い。LED・BYやFL・WWは、どの照度レベルにおいてもほぼ同等の主観評価値を示している。

評価形容詞対別に見ると「派手な－地味な」、「澄んだ－濁った」、「動的な－静的な」、「明るい－暗い」は照度の影響を強く受け、照度が低下することによって主観評価値が低下している。「美しい－汚い」、「快適な－不快な」は上記の評価形容詞対よりも照度の影響が小さく、光源間の差も僅かである。

表5-4、図5-9は2色配色24対の全平均であるが、個々の2色配色の結果を観察すると2色配色の違い、すなわち2色配色構成色によって各照明下の評価の傾向が異なることがわかった。従って次に2色配色構成色の違いによる色彩印象評価の違いを検討した。表5-4(a)、

(b)に2色配色24対それぞれに対する各照明下の主観評価値（被験者3人の全平均）を示す。表5-5(a)、(b)からも明らかなように、各照明下の主観評価値は2色配色構成色によって異なっている。赤色や橙色、ピンク色など暖色系の色相が含まれている2色配色の場合、どの照度レベルにおいてもLED・RGBはその他の光源に比べて主観評価値が高い（たとえばNo.1、No.8、No.10、No.23など）。この傾向は特に赤色が含まれている2色配色で顕著である（No.10、No.23）。一方、赤色や橙色、ピンク色の色相を含まない2色配色の場合は、光源間の主観評価値の差が僅かである（たとえばNo.2、No.3など）。

2色配色構成色の影響をさらに検討するために、光源間の主観評価値の差が特に大きい赤色を含む2色配色（No.10、No.23）、及び光源間の主観評価値の差が僅かであった赤色を含まない2色配色（No.2、No.13）について個別に検討を加えた。なおNo.10は高彩度の赤色、高彩度の緑色で構成された2色配色であり、No.23は、高彩度の赤色、高彩度の青色で構成された2色配色である。No.2は高彩度の青色、高彩度の緑色で構成された2色配色であり、No.23は高彩度の黄色と高彩度の青色で構成された2色配色である。

図5-10は、各2色配色に対する各照明下の主観評価プロフィール（被験者3人の全平均）である。赤色を含む2色配色は、LED・RGBと他の光源の主観評価値に顕著な差が生じてい

ることが分かる。赤色を含まない2色配色は、光源間の主観評価値の差が僅かである。

評価形容詞対別に見ると“派手な－地味な”、“澄んだ－濁った”、“動的な－静的な”、“明るい－暗い”は照度の影響を強く受けており、照度が低下することによって主観評価値が低下している。“美しい－汚い”、“快適な－不快な”は上記の評価形容詞対よりも照度の影響が小さく、光源間の差も僅かである。

次に、照度の影響が強く光源間の差が大きい評価形容詞対から“派手な－地味な”、照度の影響及び光源間の差が小さい評価形容詞対から“快適な－不快な”を選択し、それぞれ照度及び光源の影響を検討した。赤色を含む2色配色（No.10、No.23）及び赤色を含まない2色配色（No.2、No.13）に対する各照明下の“派手な－地味な”の主観評価結果を図5-11に示し、“快適な－不快な”の主観評価値を図5-12に示す。

表 5-4 主観評価結果の全被験者・全2色配色平均値、および標準偏差

照度	平均/ 標準偏差	LED-RGB						LED-BY						FL-WW					
		派手な/ 地味な	澄んだ/ 濁った	動的な/ 静的な	明るい/ 暗い	美しい/ 汚い	快適な/ 不快な	派手な/ 地味な	澄んだ/ 濁った	動的な/ 静的な	明るい/ 暗い	美しい/ 汚い	快適な/ 不快な	派手な/ 地味な	澄んだ/ 濁った	動的な/ 静的な	明るい/ 暗い	美しい/ 汚い	快適な/ 不快な
700	M	0.69	0.58	0.54	0.65	0.43	0.29	-0.15	0.06	-0.39	-0.21	-0.03	-0.11	-0.58	-0.35	-0.67	-0.31	-0.24	-0.08
	SD	0.87	0.62	0.82	0.63	0.47	0.45	0.53	0.60	0.53	0.51	0.52	0.48	0.44	0.63	0.41	0.62	0.60	0.52
200	M	-0.53	-0.54	-0.57	-0.61	-0.36	-0.36	-1.17	-1.06	-1.13	-1.01	-0.75	-0.63	-1.17	-1.08	-1.17	-1.13	-0.69	-0.88
	SD	0.77	0.62	0.67	0.66	0.61	0.60	0.22	0.32	0.27	0.30	0.50	0.44	0.29	0.40	0.28	0.27	0.53	0.52
50	M	-1.51	-1.40	-1.49	-1.61	-0.64	-0.75	-1.92	-1.75	-1.79	-1.79	-1.39	-1.40	-1.83	-1.88	-1.72	-1.90	-1.24	-1.25
	SD	0.67	0.51	0.59	0.51	0.54	0.53	0.15	0.40	0.40	0.26	0.35	0.39	0.39	0.45	0.46	0.27	0.61	0.62
10	M	-2.38	-2.36	-2.31	-2.47	-1.24	-1.44	-2.68	-2.58	-2.50	-2.69	-1.64	-1.81	-2.64	-2.54	-2.49	-2.64	-1.99	-2.03
	SD	0.57	0.48	0.54	0.54	0.59	0.44	0.15	0.18	0.29	0.35	0.57	0.43	0.28	0.32	0.29	0.39	0.52	0.35

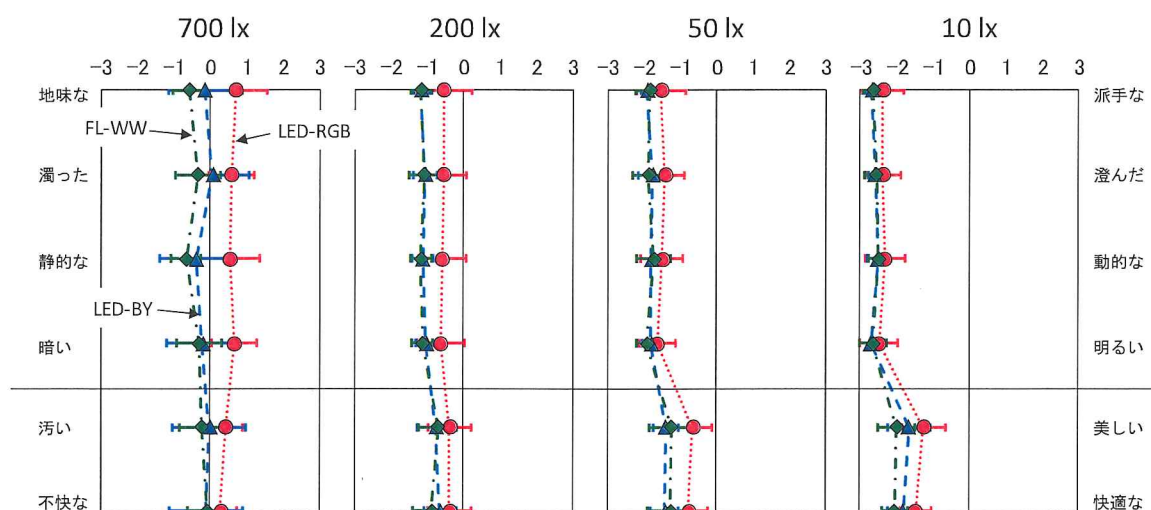


図 5-9 各照明下の主観評価プロフィール（2色配色 24 対の全平均）

図 5-11 は“派手な—地味な”の主観評価結果であるが、赤色を含む 2 色配色 (No.10、No.23) はどの光源においても照度が低下することによって主観評価値が系統的に低下していることがわかる。また LED-RGB とその他の光源間の主観評価値の差は大きく、どの照度レベルにおいても主観評価値に約 2～3 段階尺度の開きがある。また No.10、No.23 の 2 色配色はともに、LED-RGB 低照度 (10 lx)、LED-BY 高照度 (700 lx) 及び FL-WW 高照度 (700 lx) における主観評価値がほぼ同等である。これは低照度 (10 lx) の LED-RGB の主観評価値が、LED-BY や FL-WW の高照度 (700 lx) の主観評価値とほぼ同等であることを意味しており、主観評価値に対する照度の影響が光源によって異なることを意味している。

赤色を含まない 2 色配色 (No.2、No.13) の場合は、照度が低下することによってどの光源でも主観評価値が系統的に低下しているが、赤色を含む 2 色配色ほど光源間の差がない。

図 5-12 は“快適な—不快な”の主観評価結果であるが、赤色を含む 2 色配色 (No.10、No.23) 及び赤色を含まない 2 色配色 (No.2、No.13) とともに照度が低下することによって主観評価値が低下している。しかし、図 5-11 の“派手な—地味な”の主観評価結果に比べると照度レベルによる主観評価値の変化は僅かである。従って“快適な—不快な”の評価に対する照度の影響は、2 色配色構成色によらず僅かであるといえる。

以上をまとめると、色彩印象評価に対する分光分布及び照度の影響を検討するには、赤色系の色を含む 2 色配色を「派手な—地味な」、「澄んだ—濁った」、「動的な—静的な」、「明るい—暗い」の評価形容詞対で評価することが効果的であるといえる。

(b) 2色配色 No.13~No.24

イメージ	No.	照度	LED-RGB						LED-BY						FL-WW					
			派手な/ 地味な	澄んだ/ 濁った	動的な/ 静的な	明るい/ 暗い	美しい/ 汚い	快適な/ 不快な	派手な/ 地味な	澄んだ/ 濁った	動的な/ 静的な	明るい/ 暗い	美しい/ 汚い	快適な/ 不快な	派手な/ 地味な	澄んだ/ 濁った	動的な/ 静的な	明るい/ 暗い	美しい/ 汚い	快適な/ 不快な
	13	700	-0.33	-0.33	-1.00	1.00	-0.33	-0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.00	0.00	0.67	0.00	1.00	-0.33	0.00
		200	-1.00	-1.33	-1.67	-1.33	-1.33	-1.33	-1.00	0.00	-0.33	-0.67	-0.67	0.00	-1.00	0.00	-0.33	-0.67	0.00	-0.67
		50	-2.00	-1.33	-1.33	-1.67	-1.67	-2.00	-1.67	-1.67	-1.33	-1.67	-1.67	-1.33	-1.67	-0.33	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
		10	-3.00	-2.33	-2.33	-2.33	-2.33	-2.67	-2.67	-2.67	-2.00	-2.67	-2.33	-1.67	-2.67	-2.00	-2.00	-2.33	-2.33	-2.00
	14	700	0.33	0.33	0.33	0.33	0.67	0.00	-0.67	-0.33	-0.67	0.00	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.33	-0.67	-0.33	0.00
		200	-0.33	-1.00	-1.00	-1.00	-0.33	-0.67	-1.33	-1.33	-1.33	-0.67	-0.67	-0.33	-0.67	-1.33	-1.00	-1.33	-1.33	-1.00
		50	-1.67	-2.00	-1.67	-2.33	-0.33	-1.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.33	-1.00	-2.00	-0.67	-1.67	-1.67	-1.33
		10	-3.00	-2.67	-2.67	-3.00	-1.33	-1.67	-2.67	-2.67	-2.33	-3.00	-2.33	-1.67	-2.00	-1.67	-1.67	-1.67	-2.00	-1.67
	15	700	0.33	-1.00	-1.00	-1.00	-0.33	-0.67	-0.67	-1.33	-1.33	-0.67	-0.67	-0.33	-1.00	-1.33	-1.00	-1.33	-1.33	-1.00
		200	-1.00	-1.00	-1.33	-1.00	-0.33	-0.33	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-0.67	-1.00	-1.33	-1.00	-1.33	-1.00	-1.00
		50	-2.00	-2.00	-1.67	-2.00	0.00	-0.33	-2.00	-2.00	-1.67	-2.00	-1.33	-1.67	-1.67	-1.33	-1.67	-1.67	-1.00	-1.00
		10	-2.67	-2.67	-2.67	-2.67	-1.67	-2.00	-2.67	-2.67	-3.00	-2.67	-1.67	-1.67	-1.67	-2.00	-2.00	-1.67	-1.67	-2.00
	16	700	1.67	1.33	1.33	1.33	1.00	0.67	-1.00	0.67	-1.00	-1.00	-0.67	-0.67	-1.00	0.33	-1.00	-0.67	-0.33	0.00
		200	0.67	1.00	0.33	0.33	1.00	0.33	-1.33	-1.00	-1.33	-1.33	-1.00	-1.00	-1.33	-0.33	-1.33	-1.00	-0.67	-1.00
		50	-1.67	-1.67	-1.00	-1.33	-0.33	-0.67	-2.00	-2.00	-2.00	-1.67	-1.33	-1.33	-2.00	-0.33	-1.33	-1.00	-0.67	-1.00
		10	-2.00	-2.33	-2.33	-2.33	-1.67	-1.33	-2.67	-2.67	-3.00	-2.67	-1.33	-1.33	-2.67	-2.67	-3.00	-3.00	-1.67	-1.67
	17	700	-0.33	0.33	0.67	0.33	0.00	0.00	-0.33	-0.33	-0.67	-0.33	-1.00	-0.67	0.00	0.00	0.00	-0.67	0.00	0.00
		200	-1.33	-1.00	-0.33	-0.33	-1.00	-1.00	-1.33	-1.00	-1.00	-1.67	-1.00	-0.67	-1.00	-1.00	-1.67	-1.67	-0.33	-0.67
		50	-2.00	-1.67	-2.00	-1.67	-1.33	-1.33	-2.00	-1.67	-2.00	-2.00	-1.33	-1.00	-2.00	-1.67	-2.00	-2.00	-1.00	-1.00
		10	-2.67	-2.33	-2.33	-2.67	-1.67	-1.00	-2.67	-2.67	-2.67	-3.00	-0.33	-1.33	-2.67	-3.00	-2.67	-2.67	-2.00	-2.00
	18	700	-0.33	0.33	-0.33	-1.00	0.67	0.67	0.00	-0.67	0.00	-0.67	0.00	0.00	0.00	-0.33	0.33	-0.33	0.00	0.33
		200	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-0.67	-0.67	-1.00	-1.33	-1.33	-1.00	0.33	-0.33	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
		50	-2.00	-1.33	-2.00	-1.67	-1.00	-1.33	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-1.33	-1.33	-1.67	-1.67	-1.67	-2.00	-1.33	-1.00
		10	-2.67	-2.67	-2.67	-3.00	-1.33	-1.33	-2.67	-2.67	-2.67	-3.00	-1.67	-1.67	-2.67	-2.67	-2.67	-3.00	-1.33	-1.67
	19	700	1.33	1.33	1.33	1.00	1.33	1.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.00	0.00	-1.00	-0.33	-1.00	-0.33	-0.33	0.00
		200	-1.00	-0.33	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-0.67	-0.67	-0.33	0.00	-1.00	-1.00	-1.33	-1.00	0.00	-0.33
		50	-1.33	-1.00	-1.33	-1.00	-1.00	-1.00	-1.67	-1.33	-1.33	-1.33	-1.33	-1.33	-2.00	-2.00	-1.67	-2.33	-1.00	0.00
		10	-2.33	-2.67	-2.33	-3.00	-1.00	-1.33	-2.67	-2.67	-2.67	-3.00	-1.33	-1.00	-2.67	-2.67	-2.67	-3.00	-2.00	-1.67
	20	700	1.67	1.67	1.67	1.33	0.33	0.33	-1.00	-1.00	-1.33	-1.00	-1.00	-1.33	-1.00	-1.00	-1.00	-1.67	-1.67	-1.00
		200	1.00	0.67	1.00	0.00	0.67	1.00	-1.33	-2.00	-1.33	-1.33	-1.33	-1.67	-1.67	-1.67	-1.67	-1.67	-1.33	-1.33
		50	-1.00	-1.33	-1.33	-1.33	0.00	0.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-1.67	-1.33	-2.33	-2.67	-2.00	-1.67	-2.67	-2.33
		10	-2.33	-2.33	-2.33	-2.33	-1.00	-1.00	-3.00	-2.67	-2.67	-3.00	-2.00	-2.67	-3.00	-2.67	-2.67	-3.00	-2.67	-2.33
	21	700	0.00	0.00	0.33	0.33	0.67	1.00	0.00	0.33	0.00	0.33	0.67	0.33	-0.33	0.00	0.00	-0.33	0.33	0.00
		200	-0.67	-1.00	-1.00	-0.67	-0.33	-0.33	-1.00	-1.00	-1.33	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.33	-1.33	-1.00	-1.33	-1.00
		50	-1.67	-1.67	-2.00	-2.00	-1.00	-1.00	-2.00	-1.33	-2.00	-2.00	-1.67	-1.67	-1.67	-2.00	-2.00	-1.67	-1.67	-1.33
		10	-3.00	-2.67	-2.67	-3.00	-1.33	-1.33	-3.00	-2.67	-2.67	-3.00	-1.33	-1.67	-2.67	-2.67	-2.67	-2.67	-2.33	-2.33
	22	700	0.00	0.67	0.33	0.67	0.00	0.33	0.67	0.67	-0.67	0.67	0.67	0.33	0.33	0.33	0.00	0.67	1.00	0.33
		200	-0.67	-1.00	-1.00	-1.00	-0.33	-0.33	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-0.33	-0.33	-0.67	-1.00	-1.00	-1.00	0.00	0.00
		50	-1.33	-1.33	-1.67	-1.67	-0.33	-0.67	-2.00	-1.67	-1.67	-1.33	-1.00	-0.67	-1.67	-1.67	-2.00	-2.00	0.33	0.67
		10	-2.67	-3.00	-2.67	-3.00	-1.67	-1.33	-2.33	-2.33	-2.33	-2.67	-0.67	-1.33	-2.67	-2.67	-2.67	-2.67	-0.67	-1.67
	23	700	2.33	1.33	1.67	1.33	0.33	0.33	-1.00	0.33	-1.00	-0.67	0.00	-0.67	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00
		200	1.00	-0.33	-0.33	0.33	0.00	0.33	-1.67	-1.00	-1.33	-1.67	-1.67	-1.33	-1.67	-1.33	-1.33	-1.33	-1.33	-1.33
		50	0.00	-0.33	0.00	-0.67	0.00	0.00	-2.00	-1.67	-1.33	-1.67	-1.00	-1.00	-2.33	-2.00	-1.67	-2.00	-1.67	-1.67
		10	-1.00	-1.00	-0.67	-1.00	-1.00	-1.00	-2.67	-2.33	-2.00	-2.33	-1.33	-1.33	-3.00	-2.33	-2.33	-3.00	-2.00	-2.33
	24	700	-0.33	-0.33	-0.67	0.67	0.00	0.00	0.33	0.67	0.33	-0.33	0.33	0.33	0.33	0.67	-0.67	0.67	0.33	0.67
		200	-1.33	-1.00	-1.00	-1.33	-1.00	-1.00	-1.33	-1.00	-1.00	-1.00	-0.33	-0.33	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	0.33	0.33
		50	-2.33	-2.00	-2.00	-2.00	-1.00	-1.00	-2.00	-2.00	-2.00	-2.00	-1.33	-1.67	-1.67	-2.00	-2.00	-2.00	-1.33	-1.33
		10	-2.67	-2.67	-3.00	-2.67	-1.67	-1.67	-2.67	-2.33	-2.67	-2.67	-1.67	-2.33	-2.67	-2.00	-2.33	-2.33	-2.67	-2.33

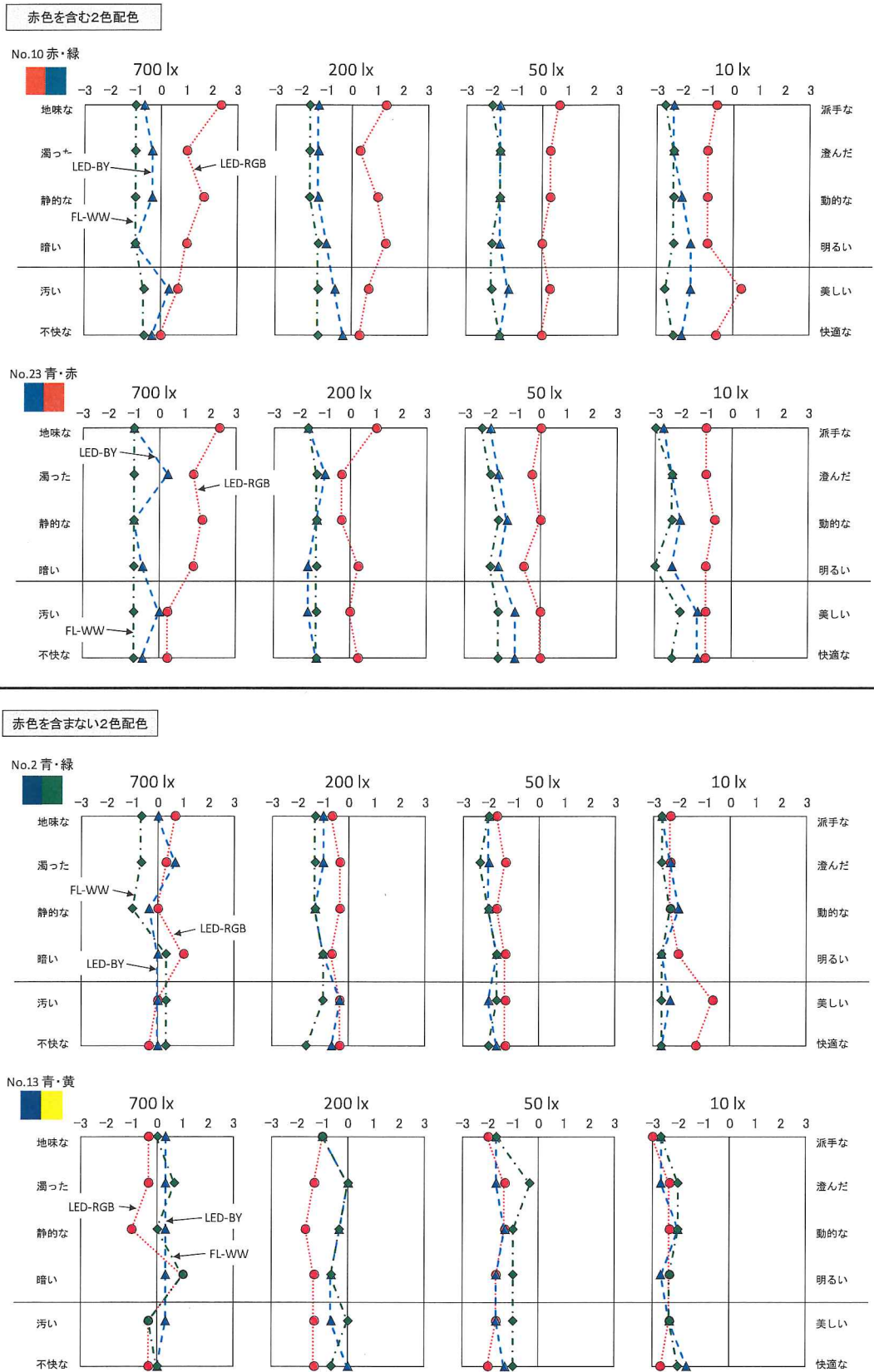


図 5-10 赤色を含む2色配色、および赤色を含まない2色配色
に対する主観評価プロフィール

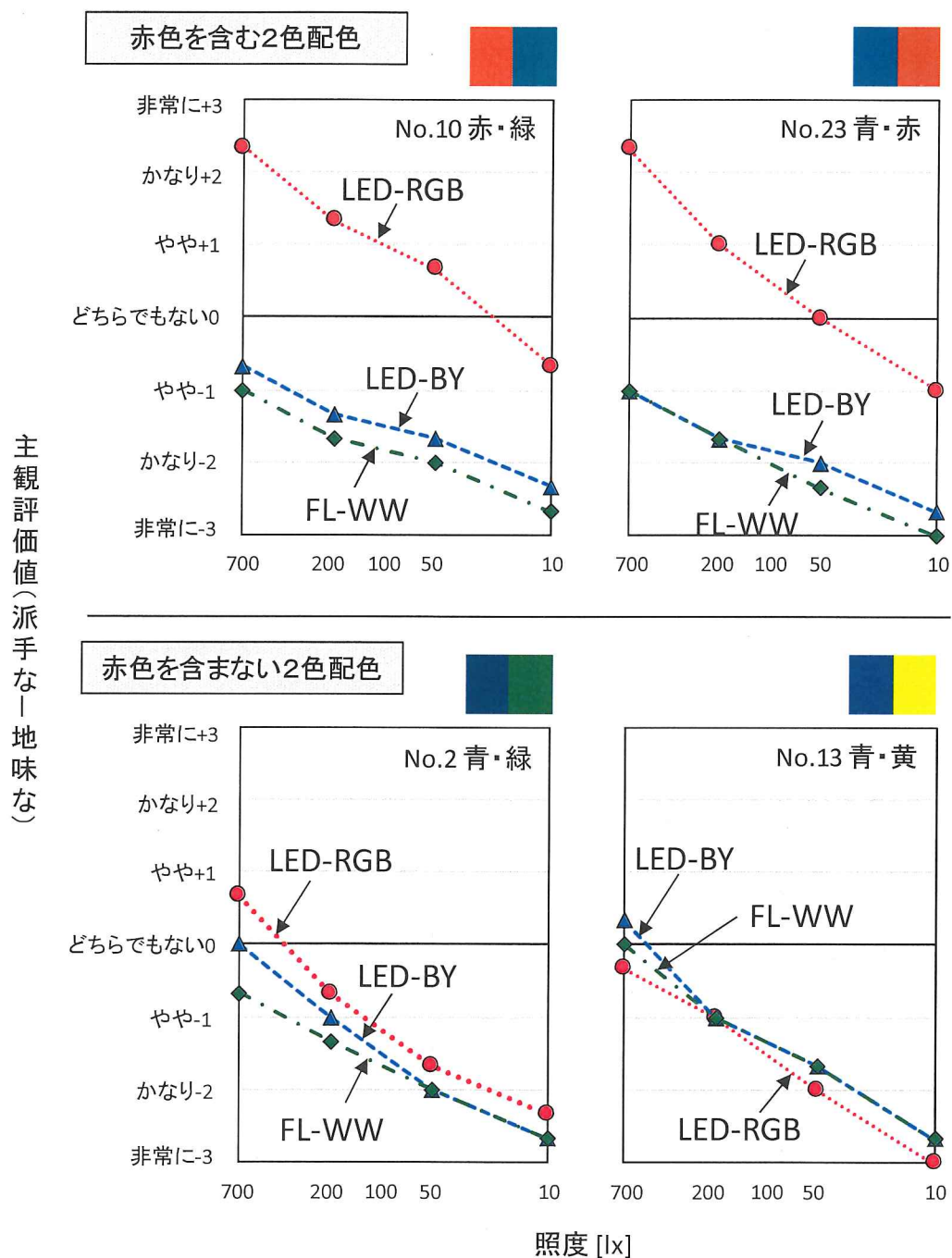


図 5-11 赤色を含む 2 色配色、および赤色を含まない 2 色配色に対する主観評価結果

縦軸：主観評価値（派手な－地味な）、横軸：照度（700 lx、200 lx、50 lx、10 lx）

△：LED-BY、◇：FL-WW、○：LED-RGB

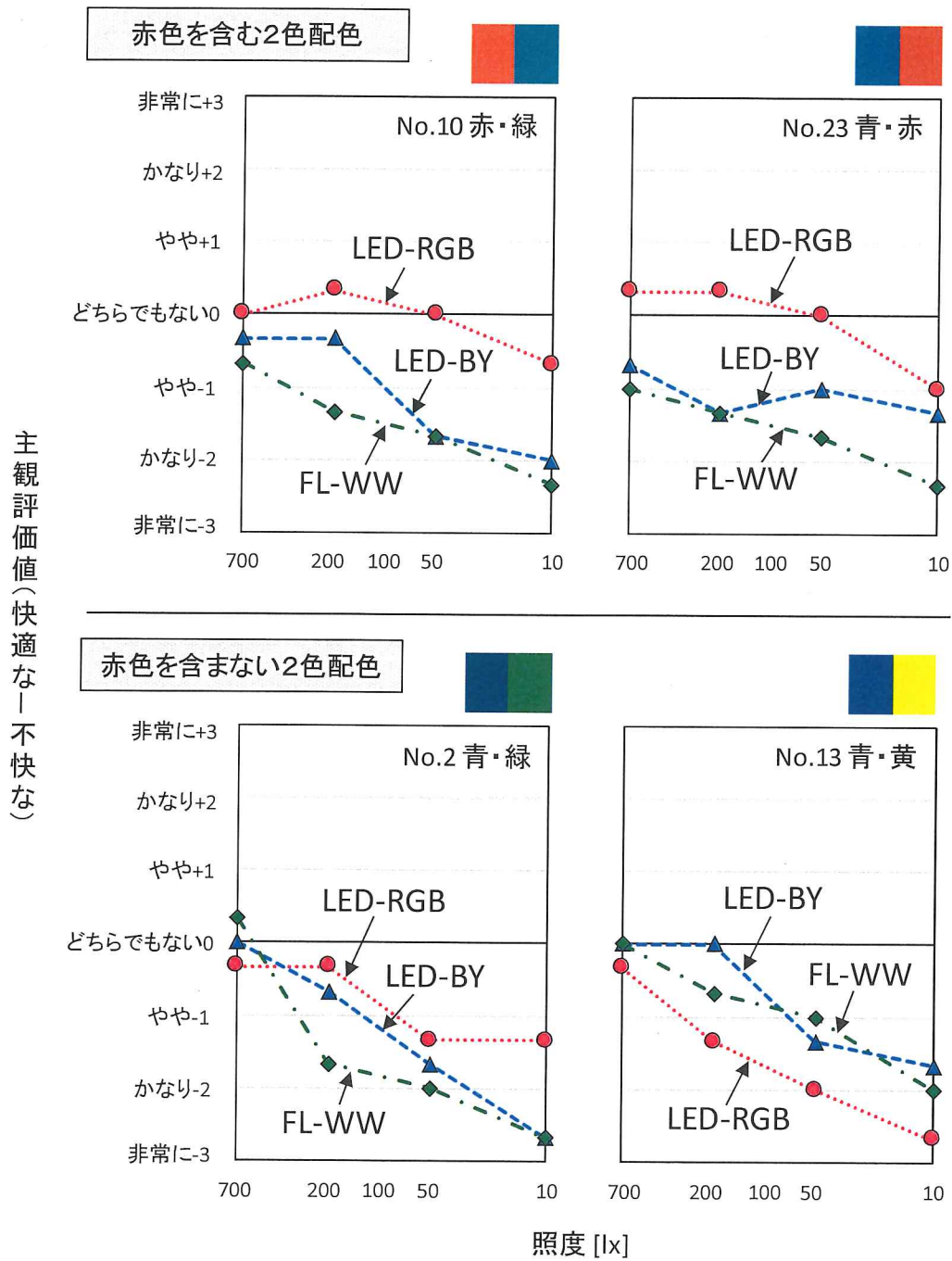


図 5-12 赤色を含む 2 色配色、および赤色を含まない 2 色配色に対する主観評価結果

縦軸：主観評価値（快適な—不快な）、横軸：照度（700 lx、200 lx、100 lx、50 lx、10 lx）

△：LED-BY、◇：FL-WW、○：LED-RGB

(b) 主観評価結果と平均演色評価数 Ra の関係

印象評価と Ra が対応しない場合があることはこれまでも報告されている⁵⁻¹⁶⁾。本章の主観評価結果と Ra が対応するのかを確認するために、第5.2.2項(a)に示した赤色を含む2色配色(No.10)に対する“派手な—地味な”の主観評価結果と Ra の関係を検討した。赤色を含む2色配色(No.10)及び“派手な—地味な”を選択したのは、これらが分光分布及び照度の影響を最も受ける組み合わせであるからである。図5-13に示すように主観評価結果が最も高いLED-RGBは Ra 21であり、用いた光源の中で最も Ra が低い光源である。さらに Ra は照度効果が考慮されていないため照度によらず値が一定であるが、主観評価値は照度によって変化している。光源及び照度の影響を受けやすいその他の評価形容詞対「澄んだ—濁った」、「動的な—静的な」、「明るい—暗い」においても同様の傾向を確認した。すなわち2色配色の色彩印象に基づく主観評価と Ra は全く対応しないことが明らかである。

以上のことから、照度効果が考慮されていない色の忠実性に基づく Ra では、異なる照度下の見かけの色や色彩印象を評価できないことが明らかになった。

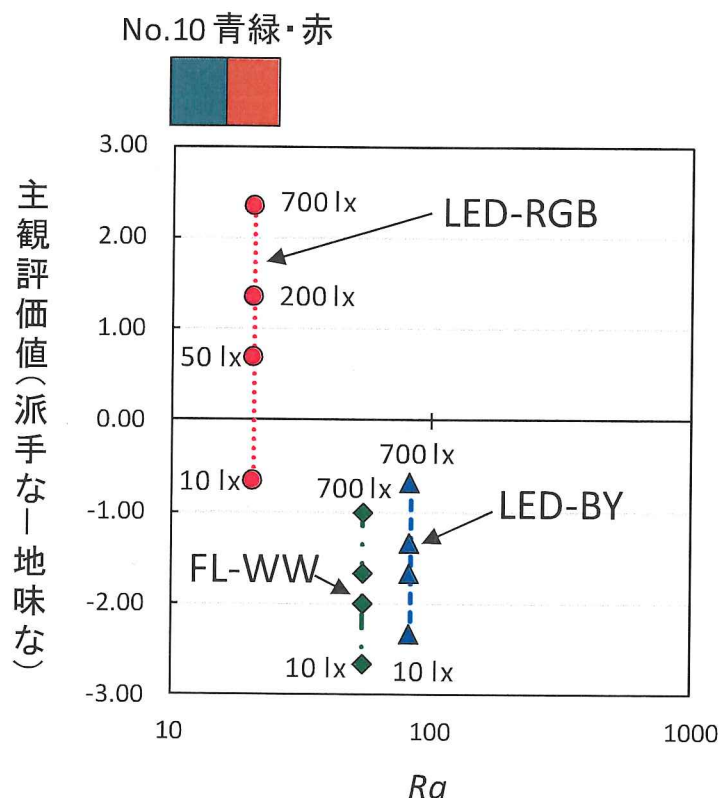


図5-13 赤色を含む2色配色(No.10)に対する主観評価結果と Ra の関係

縦軸：主観評価値（派手な—地味な）、横軸： Ra

(c) CIECAM02 (色の見えモデル) による解析

主観評価実験の結果、分光分布及び照度が異なる照明下の2色配色の色彩印象は、評価形容詞対及び2色配色構成色、特に赤色系の色の影響を受けることが明らかになった。特に赤色を含む2色配色に対する“派手な—地味な”、“澄んだ—濁った”、“動的な—静的な”、“明るい—暗い”の主観評価結果は光源間の主観評価値の差が顕著であり、どの照度レベルにおいてもLED-RGBがその他の光源よりも高い主観評価値を示した。これは主観評価値に対する照度の影響が光源によって異なることを意味している。

ここでは各光源、各照度レベルの色の見えを測色的に確認し、主観評価結果との関係を見るため前述の(a)主観評価値に対する分光分布、照度の影響で示した赤色を含む2色配色(No.10、No.23)、及び赤色を含まない2色配色(No.2、No.13)を対象に第4章で述べたCIECAM02^{5・17)}による解析を行った。

図5-13は、赤色を含む2色配色(No.10、No.23)及び赤色を含まない2色配色(No.2、No.13)の分光反射率(コニカミノルタ社製分光測色計CM-700d、400-700 nm、波長間隔: 10 nm、測定径: $\Phi 3$ mm)。なお、CM-700dによって得られる分光反射率は10 nm間隔であるため、以下の測色計算では5 nmに線形補間した400-700 nmの値を用いた。この分光反射率を用いて、光源(FL-EDL、LED-RGB、LED-BY、FL-WW)、照度(700 lx、200 lx、50 lx、10 lx)ごとにCIECAM02の a_M 値、 b_M 値を求めた。 $a_M b_M$ とはCIECAM02の出力値でカラフルネス(M)に基づいた色相、鮮やかさに対応する値である。

図5-14(a)、(b)、(c)は、各照明下の $a_M b_M$ カラフルネス座標上の色域(Color Gamut)である。色域とは赤色を含む2色配色(No.10、No.23)及び赤色を含まない2色配色(No.2、No.13)それぞれの単色の $a_M b_M$ 値(8点)を線で結んだ範囲である。(a)はLED-RGBの色域であり、(b)はLED-BYの色域であり、(c)はFL-WWの色域である。なお各図の実線(黒)は参照光源であるFL-EDL 700 lxの色域である。図5-14(a)、(b)、(c)に示されているように、どの光源においても照度低下に伴って色域が縮小しているのが明らかである。

次に各光源の色域の特徴について考察する。図5-14(a)LED-RGBの場合、700 lxではFL-EDL 700 lxに比べ赤色—緑色方向に色域が拡大している。しかし黄色—青色方向には色域の拡大が見られず、赤色—緑色方向の拡大に対し、押しつぶされた形状である。照度が低下すると色域は相対的に縮小していくが、LED-RGB 10 lxの赤色、緑色に対する $a_M b_M$ 値はFL-EDL 700 lxの $a_M b_M$ 値とほぼ同等の値を示している。

図5-14(b)LED-BYの場合、700 lxではFL-EDLの色域とほぼ同等の形状を有してい

るが、赤色が若干縮小している。照度が低下すると色域は相対的に縮小していき、10 lx ではどの色相においても FL-EDL700 lx と比べ低カラフルネスを示している。

図 5-14 (c) FL-WW の場合、700 lx では FL-EDL の色域に比べて赤色－緑色方向に縮小している。黄色については若干色域拡大している。照度が低下すると色域は相対的に縮小していき、10 lx ではどの色相においても FL-EDL700 lx と比べ低カラフルネスを示すが、特に赤色－緑色方向のカラフルネス低下が著しい。

表 5-6 に各照明下の色域面積 (S) を示す。表 5-6 に示されるようにどの照度レベルにおいても LED-RGB の色域面積が他のランプと比較して大きく、次いで LED-BY、FL-WW の順となっている。これは赤色を含む 2 色配色の「派手な－地味な」、「澄んだ－濁った」、「動的な－静的な」、「明るい－暗い」の主観評価結果に対する光源の相対関係と同等である。

以上のことから、LED-RGB がその他の光源に比べて高い主観評価結果であったのは、他の光源よりも色域面積が大きい、すなわち 2 色配色、特に赤色が鮮やかに演色されていたためであると推測できる。

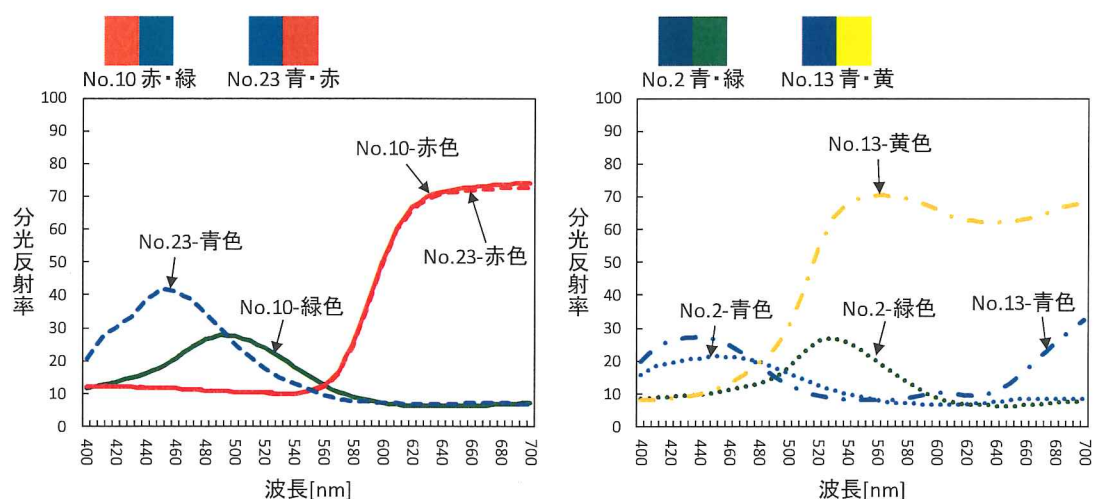


図 5-14 2 色配色の分光反射率 (CM-700d で測定)

左：赤色を含む 2 色配色 (No.10、No.23) 右：赤色を含まない 2 色配色 (No.2、No.13)

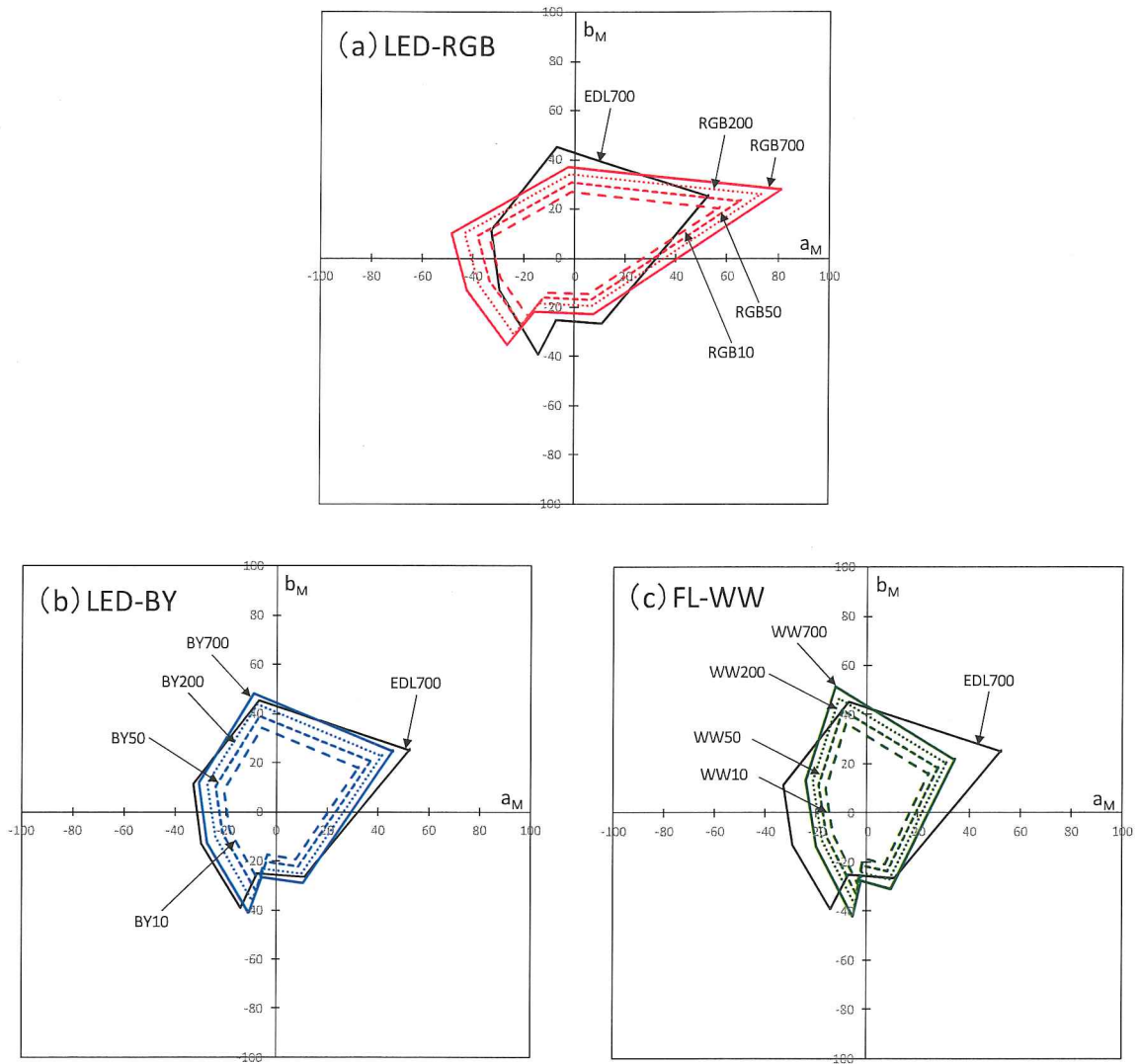


図 5-15 各照明下における 2 色配色 (4 対、計 8 色) の色域

(a) : LED-RGB、(b) : LED-BY、(c) : FL-WW

実線 (黒) : 参照光源 FL-EDL700 1x の色域

表 5-6 各照明条件の色域面積

光源	照度			
	700	200	50	10
FL-EDL	3938			
LED-RGB	4809	3876	3056	2326
LED-BY	3768	3035	2391	1818
FL-WW	3055	2463	1941	1476

5.3 結論

主観評価実験及び CIECAM02 による解析によって、分光分布及び照度が異なる照明下の 2 色配色の色彩印象は、評価形容詞対及び 2 色配色構成色、特に赤色系の色の影響を受けることが明らかになった。

以下に本章の結果をまとめる。

1. 分光分布及び照度が異なる照明下の 2 色配色の色彩印象は、評価形容詞対及び 2 色配色構成色の影響を受ける。特に赤色系の色を含む 2 色配色を「派手な—地味な」、「澄んだ—濁った」、「動的な—静的な」、「明るい—暗い」の評価形容詞対で評価した場合、主観評価値は照度の影響を強く受け、照度が低下することによって系統的に低下した。さらにこれらの評価形容詞対は光源による主観評価値の差も大きい。「美しい—汚い」、「快適な—不快な」は上記の評価形容詞対よりも照度の影響が小さく、光源間の差も僅かである。
2. 分光分布及び照度が異なる照明下の 2 色配色に対する色彩印象に基づく主観評価結果は Ra と対応しない。すなわち、照度効果が考慮されていない色の忠実性に基づく Ra では分光分布、照度が異なる照明下の色彩印象を評価できない。
3. CIECAM02 による色域面積は、LED-RGB がどの照度レベルにおいても他のランプと比較して大きく、その値は LED-RGB、LED-BY、FL-WW の順であった。これは赤色を含む 2 色配色の“派手な—地味な”の主観評価結果に対する光源の相対関係と同等であり、LED-RGB がその他の光源に比べて高い主観評価結果であったのは、他の光源よりも色域面積が大きい、すなわち 2 色配色、特に赤色が鮮やかに演色されていたためであると推測できる。

以上のことから、美術館照明を評価するには Ra に代わる照度を考慮した新しい演色性評価方法が必要であり、次章において新しい演色性評価方法の概念を考察する。

第6章

「色質」に基づいた演色性の新しい考え方

第6章 「色質」に基づいた演色性の新しい考え方

6.1 はじめに

前章では、多色配色の中で最も単純な2色配色を用いて、2色配色から受ける色彩印象評価に対する分光分布、照度の影響を主観評価実験によって検討した。その結果、色彩印象評価に対する分光分布及び照度の影響の程度は、評価形容詞対と2色配色構成色によって異なることを示した。配色の片側に赤色系の色を含む2色配色は分光分布や照度の影響を受けやすく、赤色が含まれていない2色配色は影響を受けない。また「派手なー地味な」、「澄んだー濁った」、「動的なー静的な」、「明るいー暗い」の評価は分光分布や照度の影響を受けやすく、照度が低下することによって主観評価値が大きく低下した。一方、「美しいー汚い」、「快適なー不快な」の評価は分光分布及び照度の影響が小さい。

従って演色性に対する照度の効果を定量的かつ効果的に評価するためには、適切な評価尺度と観察対象物の選択が重要である。

本章の目的は、美術館照明における演色性の考え方を整理し、分光分布、照度が異なる照明下における多色配色の色の見えを主観評価実験により検討し、その評価構造を探ることである。次にその評価構造から異なる照明下における有彩色物体がどのような評価尺度に基づいて評価されているのかを明らかにし、演色性に対する照度の効果を定量的に評価できる尺度を抽出することである。

6.2 美術館照明における演色性の考え方

6.2.1 美術館照明を評価する新しい評価尺度

第2章で示したように光源の演色性の考え方には様々あり、CIE/JIS法で採用されている“色の忠実性”の他、“色の好ましさ”、“色域”、“色識別”、“目立ち感”、“記憶色”、“カテゴリカルカラー”、“色彩調和”、“明瞭性”、“色の自然らしさ”、“色の魅力度”などがある。これらの考え方、判断基準は評価結果に大きく影響し、たとえば“色の忠実性”は基準光源との色の一致度に基づき色ずれが小さい光源ほど良いと評価されるのに対し、“色の好ましさ”は一般的に基準光源（または基準となる色）よりやや鮮やかな色に演色する光源が好ましいと評価される⁶⁻¹⁾。

その一方で、演色性に関する研究では「Color Quality」という用語が演色性の考え方によらず広く多用されており^{6-2) ~6-3)}、CIEの演色性に関する技術報告書⁶⁻⁴⁾においてもその記述がある。しかし、CIE技術報告書においても「Color Quality」の定義は不明確であり、そ

の他の研究においても「Color Quality」を明確に説明したものは見当たらない。わが国においてはかつて JIS Z8105-1982「色に関する用語」⁶⁻⁵⁾で「色質」が定義されていたが、その意味は“色相と彩度を同時に考えた場合の色知（感）覚の属性、クロマティックネスと同義”であり「Color Quality」の対応日本語ではない。

「Color Quality」は直訳すると「色の質」である。これまでの諸研究では光源及び照明環境の質を表す用語として用いられていることが多く^{6-2) ~6-3)}、一般的に「Color Quality」が高い光源は、広義に高い演色性をもつ光源（高 Ra という意味だけではない）であると意味付けられている。すなわち「Color Quality」は照明された有彩色物体から受けるさまざまな色彩印象を複合的にとらえたものと考え、本研究では「色質（しきしつ）」と呼ぶこととした。

本章では「色質」の評価構造を明らかにし、「色質」に基づいた美術館照明の新しい評価尺度の可能性を検討する。なお、ここで示す「色質」は本研究で新しく定義する言葉であるため、カッコ（「 」）付きで記載する。

6.2.2 「色質」の仮説

「色質」を定義するにあたり、“色の忠実性”、“色の好ましさ”、“明瞭性、快適性、魅力度などの感性”の3種類に大別して考察する。

“色の忠実性”に関しては第3章の美術館照明の実態調査結果から、光に弱い美術作品の展示照明では CIE 推奨値よりもさらに低い照度に設定されていることを確認した。第4章で述べたように美術館・博物館用の高演色形蛍光灯であっても照度低下によって色の見えが変化するため、 Ra の数値だけでは光源の演色性を評価できないことも確認した。さらに第5章では2色配色に対する色彩印象評価と Ra が対応しないことを確認した。従って Ra に代表される“色の忠実性”の評価方法で、高照度から低照度に設定される美術館照明の「色質」を評価することはできない。

次に“色の好ましさ”について考察する。色の好ましさに基づいた演色性研究は盛んに実施されており、その多くが日常で目にする物を評価対象物としている。日常で目にする物、つまりバナナや赤リンゴなどの熟知物の場合、実物より適度に鮮やかな色に演色する光源が好ましく評価されることが知られている⁶⁻¹⁾。絵画の場合、固有色をもつ物が描かれた絵画は、色票よりも評価が容易であるとの報告もある⁶⁻⁶⁾が、被験者にとって馴染みのある絵画であるか否かで好ましさの評価にばらつきが生じるとの報告もあり⁶⁻⁷⁾、色票や熟知物よりも判断が複雑であることが予測される。このことから熟知物など固有色をもつ物と、色票や絵画など固有色をもたない物とでは好ましい色の評価傾向が異なり、固有色をもたない物は

人によって好ましい色が異なるため個人差が大きくなることが予測できる。制作者の創造物である美術作品もその多くは固有色の概念をもたないと考えられるため、美術作品を鑑賞する立場においての色の好ましさは鑑賞者によってさまざまなはずである。従って“色の好ましさ”という尺度で美術館照明の「色質」を評価することはできない。

色の忠実性、色の好ましさ以外の感性に関しては、“明瞭性”⁶⁻⁸⁾、“快適性”⁶⁻⁹⁾、“魅力度”⁶⁻¹⁰⁾など色の見え、及び照明空間に対する複合的な評価に基づいた演色性研究がある。

“快適性”、“魅力度”は“好ましさ”と対応すると考えられるため「色質」の尺度には適さないが、“明瞭性”は、色の忠実性や色の好ましさとは別の評価概念であり「色質」との関連が強いと思われる。

“明瞭性”に関連する評価概念として“明るさ感”がある。“明るさ感”とは第 2.2.3 項にも示したが、照明に使用する光源の演色性の差によって照明された有彩色物体群からなる全体環境が測光的には同じ照度でありながら、人間には異なって知覚される明るさと定義される⁶⁻¹¹⁾。“明るさ感”と演色性の関係はこれまでも数多く研究されており⁶⁻⁸⁾、⁶⁻¹²⁾~⁶⁻¹⁹⁾、これらの実験の多くは演色性の良い光源が悪い光源よりも低い照度で同程度の“明るさ感”が得られると述べている。“明るさ感”は“目立ち感情”とも対応しており、この“目立ち感情”は照明された有彩色物体を構成する配色から受ける目立ち感情で説明できることが明らかになっている⁶⁻²⁰⁾。上記の“明瞭性”に関連する評価に対応する心理物理計量値としては、有彩色物体の色の鮮やかさを表すメトリッククロマが挙げられ、有彩色物体が高メトリッククロマに演色されるほど“明瞭性”は高くなる⁶⁻²⁰⁾。

照度低下によって低彩度化、低明度化した色を、光源によって完全に元の色へと戻すのは不可能である。しかし、光源によって美術作品全体の見かけの“鮮やかさ”や“明るさ”などの印象に基づく感性を高照度下と同程度に補正するという考えはこれまでも示されている。

Thornton は、3 錐体の感度ピークに相当する 3 つの狭帯域分光分布 (prime color) で構成される分光分布は明瞭性が高く、低照度下においても他のランプの高照度下と同等の色や視認性が得られると述べている⁶⁻²¹⁾。

Berns は、赤色・緑色・青色の 3 原色タイプの白色 LED ランプは分光分布設計によって物体色のメトリッククロマ (C^*) を増減させることができ、有彩色物体の彩度を強調する演色効果を活用することによって、照度低下によって失われた鮮やかさや明瞭性を補正することができる⁶⁻²²⁾。

以上から、照度規制のある美術館照明の演色性は“明瞭性”など有彩色物体の“鮮やかさ”

や“明るさ”に関連する感性によって定量的に評価できるのではないかと推定する。

本章では、美術作品全体の“鮮やかさ”、“明るさ”の印象が維持されることによって低照度下でも美術作品全体の色の印象としての満足感が得られると考え、「色質」を「高照度から低照度に設定される美術館照明下の作品鑑賞の視点において、知覚的な鮮やかさ、明るさに基づく色の見えの印象が最低限補償されることによって生じる満足感（色の全体印象、色の豊富さ）に対応する尺度」と仮定する。この仮説を検証するために、次節において異なる照明下の多色配色に対する色彩印象評価実験を実施し、「色質」の評価構造を明らかにする。

6.3 多色配色に対する色彩印象評価

本節では 6.2.2 項で仮定した「色質」の評価構造を確認するため、日本画の画材を用いて多色配色 (mosaic) を作成し、分光分布及び照度が異なる照明下において主観評価実験を行う。

6.3.1 多色配色 (mosaic) の作成

前章で示したように、分光分布及び照度が異なる照明下の 2 色配色の色彩印象は、評価形容詞対及び 2 色配色構成色の影響を受け、特に赤色系の色を含む 2 色配色は主観評価値の差が大きい。従って「色質」の評価構造を明らかにするためには、赤色を含む配色である必要があると考えた。

また 50 lx 以下と低照度での展示が推奨されている日本画は、主に岩絵具、箔を用いて、和紙や絹に描かれる。岩絵具、箔などの画材は保存科学の性格が強く、色彩科学的なアプローチを行った研究が少ない。美術館照明を想定した演色性評価方法確立するには、様々な照明下における画材の演色の特徴についても検証する必要がある。

以上のことから、実際に日本画で用いられている画材を用いて、基本的な色相である赤色、黄色、緑色、青色を含む多色配色 (mosaic) を観察対象物として作成した。

(a) 岩絵具

岩絵具とは天然の鉱物や人工のガラスを砕き、精製して作られる顔料である。岩絵具は砕く材料によって種類が異なり、天然鉱物からできた天然岩絵具、染料で特殊着色してつくられたガラスを砕く新岩絵具、酸化物を混合して高温で焼いて作ったガラスを砕いた合成岩絵具などがある。図 6-1 に示すように岩絵具は粒子の大きさに区別され、同じ鉱物でも粒子経

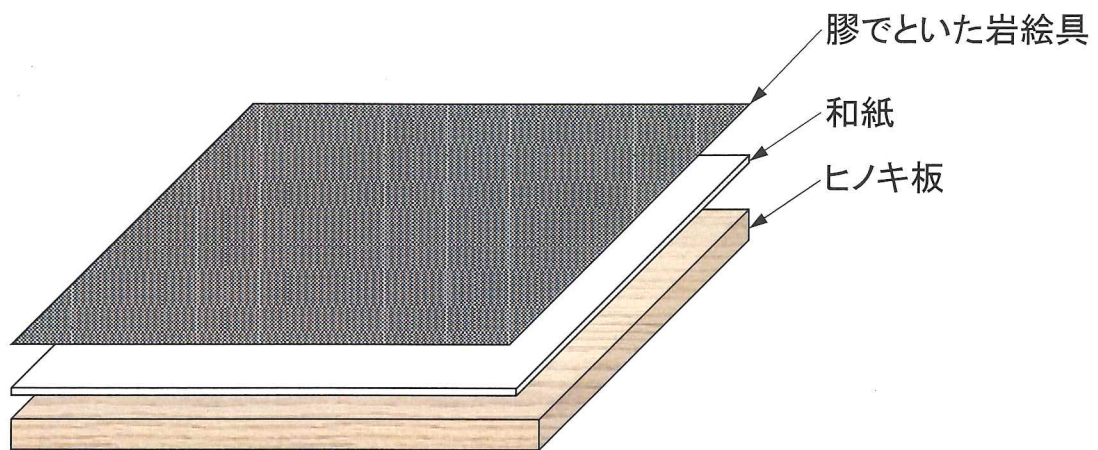


図 6-3 岩絵具色票の構造

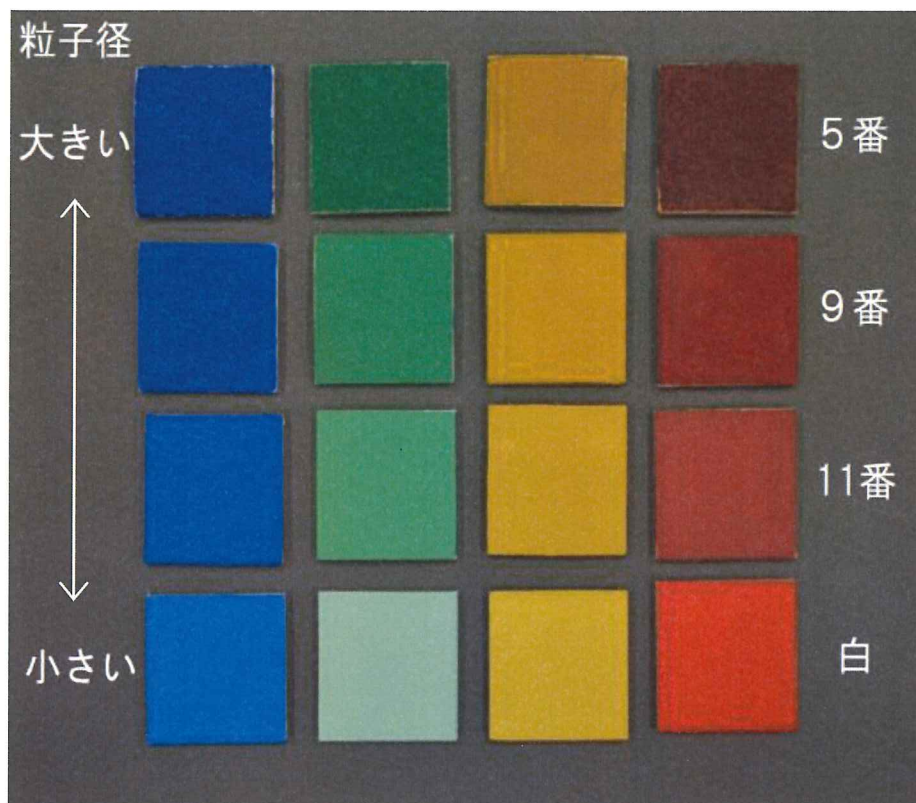


図 6-2 岩絵具色票 16 種類（青色：群青、緑色：緑青、黄色：黄土、赤色：辰砂）

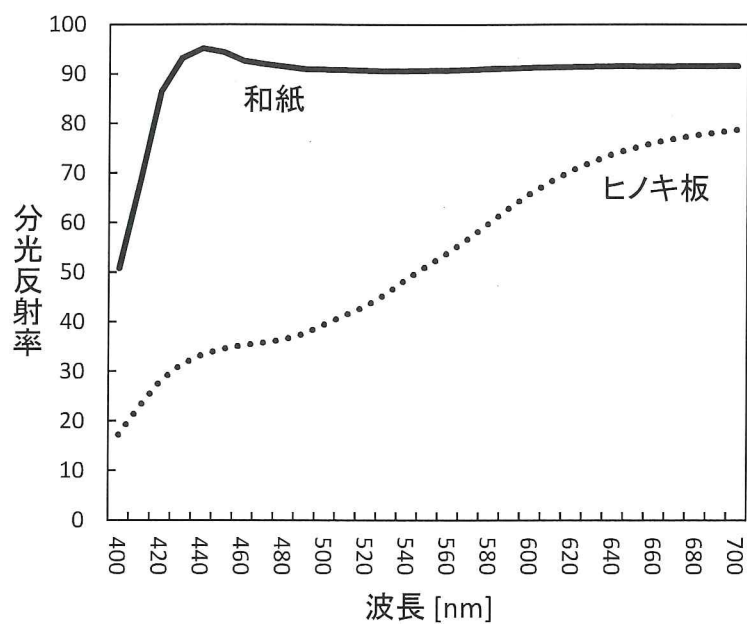


図 6-4 ヒノキ板および和紙の分光反射率

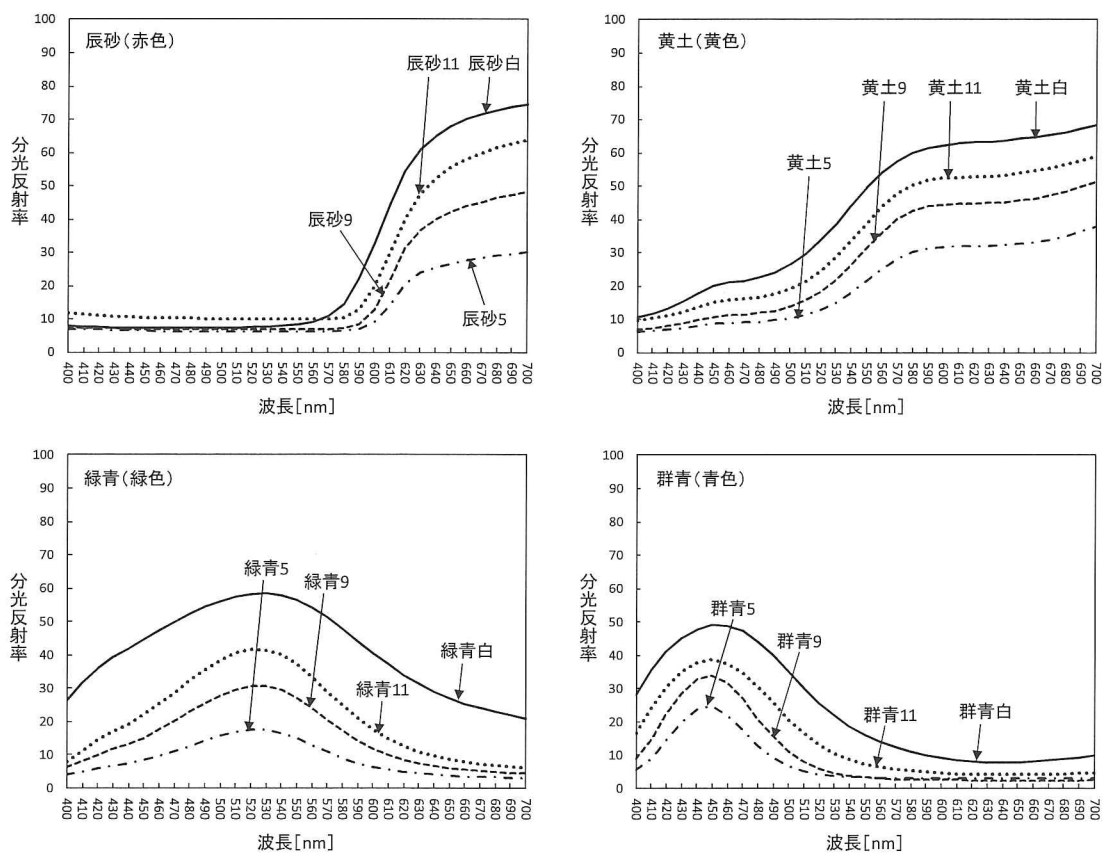


図 6-5 天然岩絵具の分光反射率（粒子径：色相ごとに 4 種類、白番・11 番・9 番・5 番）

左上：辰砂、右上：黄土、左下：緑青、右下：群青

表 6-1 岩絵具色票の色彩特性

CIECAM02 : ブライトネス Q 、カラフルネス $a_M b_M$

(FL-EDL 700 lxで計算)			
サンプル	Q	a_M	b_M
辰砂白	134.4	54.4	26.4
辰砂11	127.0	42.9	14.3
辰砂9	116.2	41.8	14.6
辰砂5	107.0	30.4	9.8
黄土白	168.9	9.6	30.5
黄土11	159.7	11.6	30.2
黄土9	151.5	12.7	31.6
黄土5	84.9	13.0	26.4
緑青白	164.4	-21.8	4.9
緑青11	140.6	-35.8	6.4
緑青9	128.0	-34.6	6.3
緑青5	108.6	-29.7	5.1
群青白	121.2	-20.3	-39.1
群青11	101.4	-14.5	-44.2
群青9	85.9	-8.1	-47.4
群青5	83.4	-0.9	-39.2

(b) 金箔

箔とは金属を叩いて紙のように薄く延ばしたものの総称である。日本の金箔は厚さをおよそ 0.1μ まで薄く延ばしたもので、金の含有率が 58.82 %以上のものを純金箔と呼び、金・銀・銅の合金の比率によって数種に分類されている。4号箔を基準に、金の含有率が増加するにつれてやわらかく赤みのある金箔となり、金と銅が減少し銀が増加するにつれ青みへ、さらに銀が増加すると硬く白みの金箔となる。

ここでは、純金、五毛色、1号色、2号色の金箔を用いて4種類の金箔色票を作成した。まず金箔色票を作成する前に箔を貼る裏板の影響及びニス、接着剤、保護材の色の影響を確認した。ヒノキ板、プラスチック（白、黒）それぞれに4号箔を貼り（図 6-6）、分光反射率の測定を行った結果を図 6-7 に示す。図 6-7 に示すように、3種の裏板の違いによる分光反射率にほとんど差は認められず、裏板の影響は無いことを確認した。そのため以下の作成にはヒノキ板を用いることにした。



図 6-6 ヒノキ板、プラスチック（白、黒）に貼った 4 号箔
（FL-EDL 照明下で撮影）

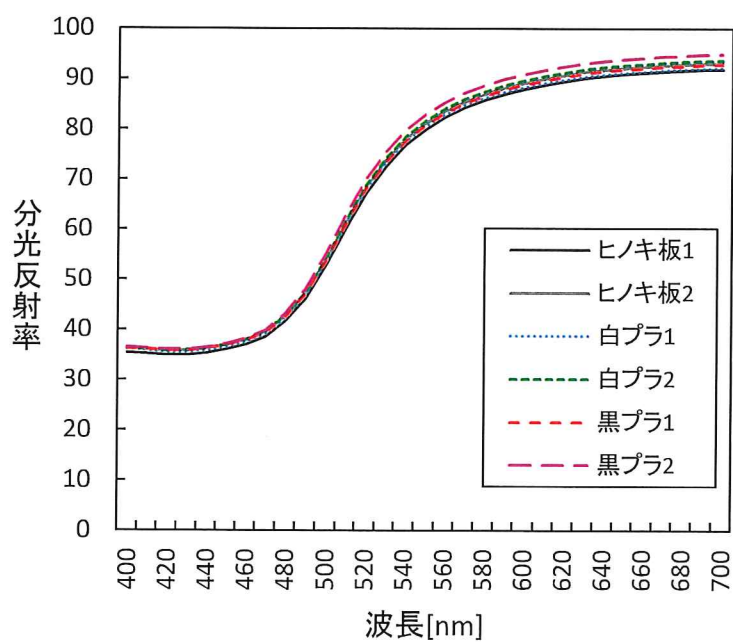


図 6-7 ヒノキ板、プラスチック（白、黒）に貼った 4 号箔の分光反射率

金箔色票の作成行程は以下の通りである。

- ① 接着剤が板へしみ込むのを防ぐため、ヒノキ板（ $5.0 \times 5.0 \times 0.3$ cm）に透明ニス塗布し、完全に乾燥させる。
- ② 専用うすめ液で溶かした箔押専用接着剤（Zブラック）を用いて箔を貼る。
- ③ 箔の定着のために保護材（ザボンエナメル）を塗布する。

図 6-8 に示すように、金箔色票は 5 層からなる。ヒノキ板、ニスの塗布、箔の接着、保護材塗布、それぞれの段階ごとの分光反射率を図 6-9 に示す。図 6-9 に示すようにヒノキ板に対するニス、接着剤、保護材の色の影響は僅かであることが判明した。従って以上のヒノキ板と道具（図 6-10）を用いて、金箔色票を作成した。金箔色票 4 種類の分光反射率を図 6-11 に示す。

さらに上記の金箔色票 4 種類の分光反射率から FL-EDL700 lx 下での CIECAM02 ブライトネス（Q）及びカラフルネス（ambM）を算出した。表 6-2 に金箔色票 4 種類の色彩特性（Q 値、ambM 値）を示す。

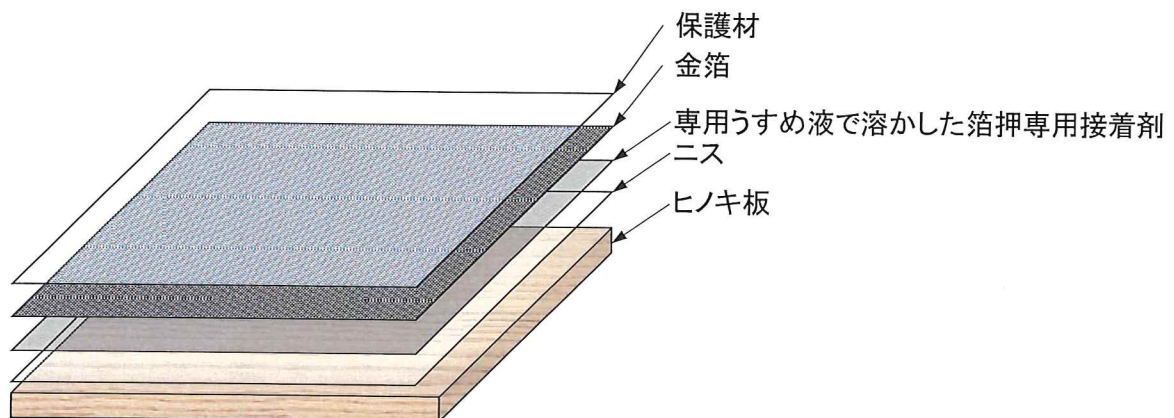


図 6-8 金箔色票の構造

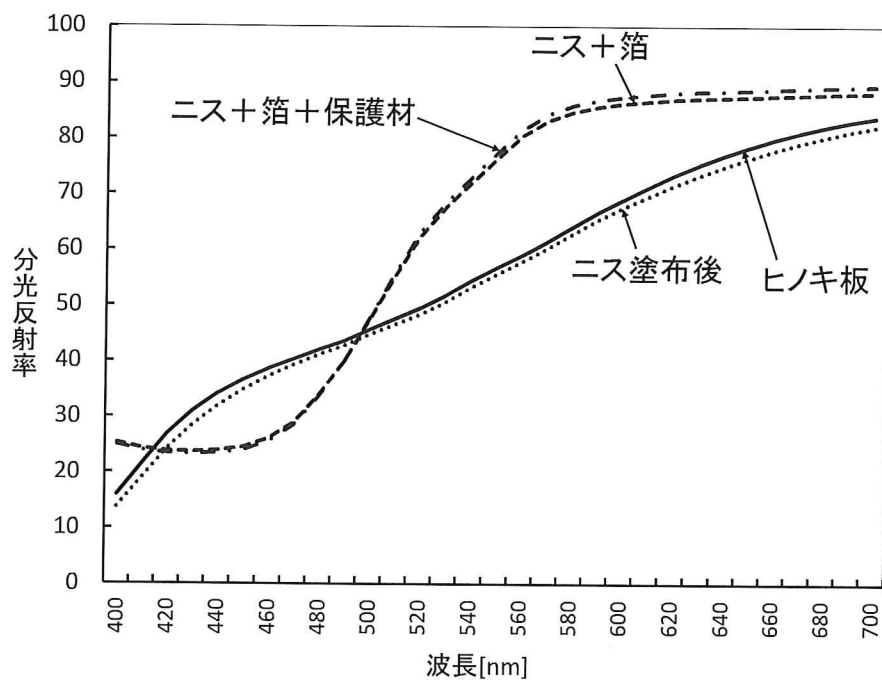


図 6-9 檜板、ニスの塗布、箔の接着、保護材塗布、それぞれの段階ごとの分光反射率



図 6-10 金箔色票作成に用いた道具

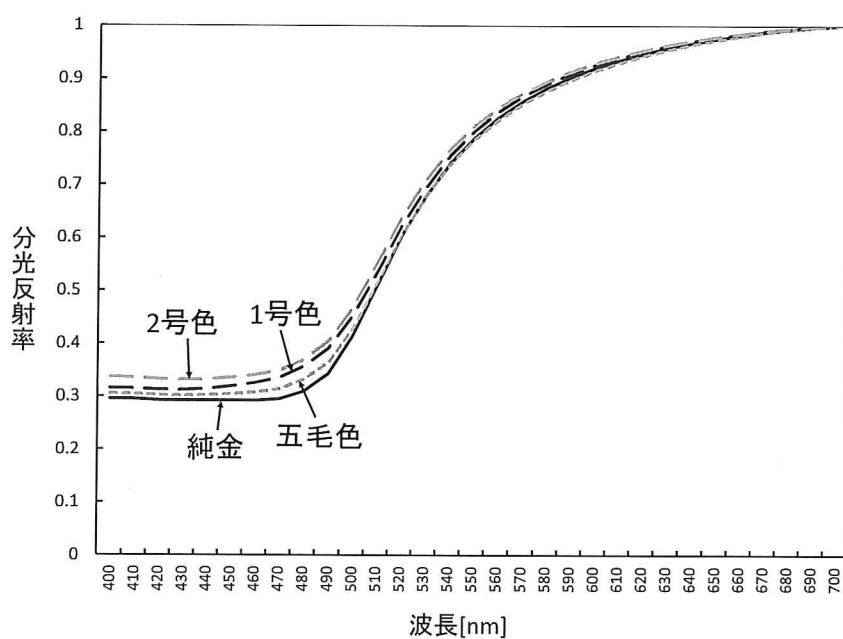


図 6-11 金箔色票の分光反射率（純金、五毛色、1号色、2号色）

表 6-2 金箔色票の色彩特性

CIECAM02 : ブライツネス Q 、カラフルネス $a_M b_M$

(FL-EDL 700 lxで計算)

サンプル	Q	a_M	b_M
純金	172.7	6.9	33.1
五毛色	172.0	6.9	30.9
1号色	166.1	6.3	29.0
2号色	171.7	6.2	28.4

(c) 多色配色 (mosaic) の作成

多色配色 (mosaic) は、岩絵具色票 16 種類及び金箔色票 4 種類の計 20 種類 (20 色) からなる。20 色は各色に数字を割り当て、乱数表に従って黒色ボード紙 (30.0×21.0 cm) に隙間なくランダムに配置した。黒色ボード紙の分光反射率を図 6-12 に示し、多色配色 (mosaic) を図 6-13 に示す。

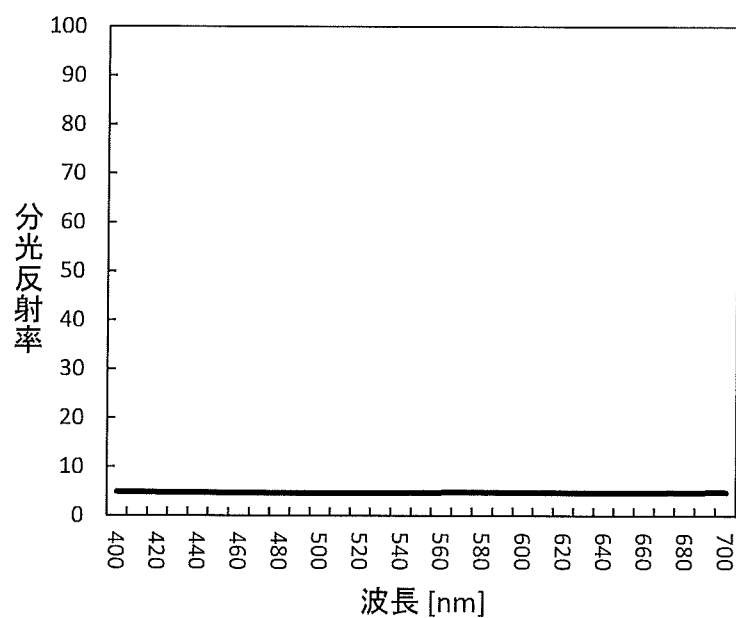


図 6-12 黒色ボード紙の分光反射率

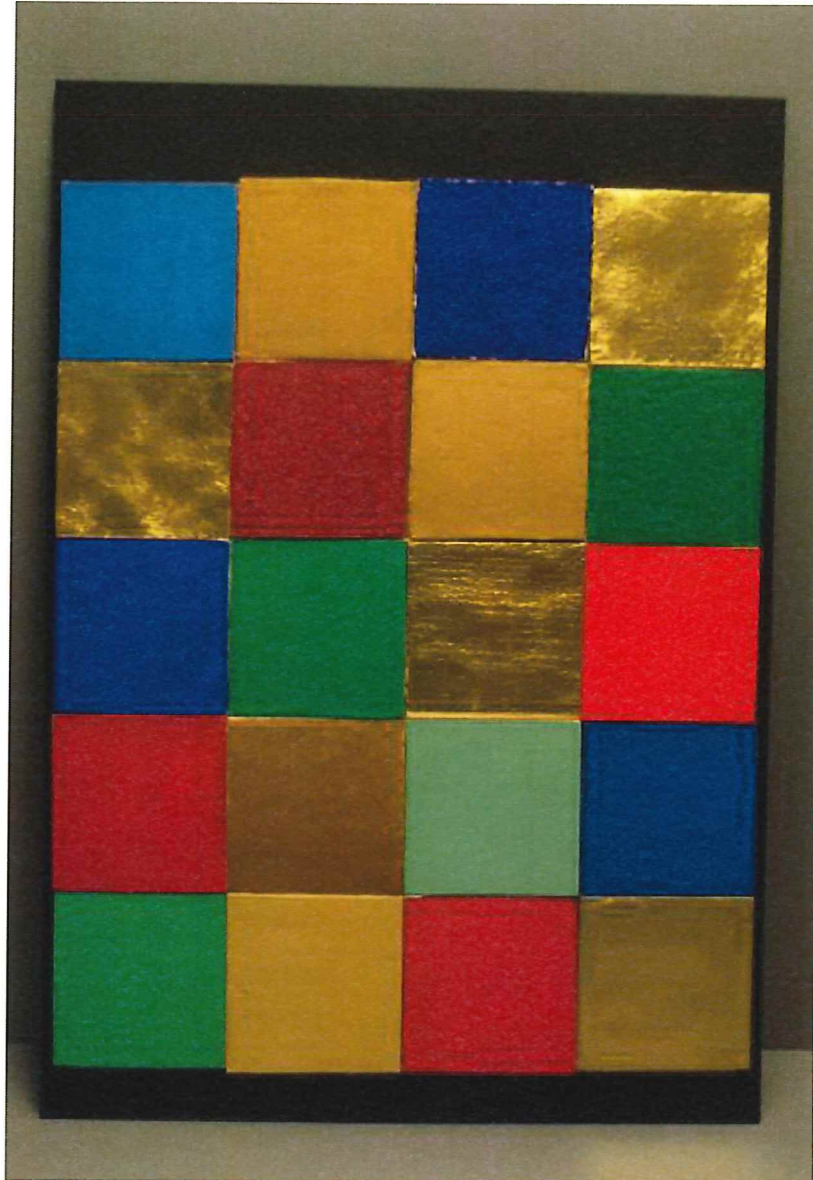


図 6-13 多色配色 (mosaic)

6.3.2 実験

多色配色の色彩印象評価が分光分布、照度の影響をどのように受けるのかを明らかにし、「色質」の定義を検証するため、6.3.1 項 (c) で作成した多色配色 (mosaic) を用いて分光分布及び照度が異なる照明下において主観評価実験を行った。

(a) 実験方法

実験は両眼隔壁法によって行い、左眼で観察する美術館用蛍光灯ランプ (パナソニック社製 FL20S・L-EDL・NU) 700 lx 下での観察対象物の色彩印象を基準に、右眼で観察するテスト照明条件下の観察対象物の色彩印象を比較評価した。

被験者は 18 歳から 33 歳の美術大学の学生 13 名 (女性) である。5 名は色彩評価に習熟した学生であり、8 名は美術制作を学ぶ学生である。眼鏡及びコンタクトレンズの使用制限は特に行わなかったが、日常的に視力矯正している被験者についてはその状態で実験に参加するよう教示した。

(b) 評価観察ブース

実験に用いた評価観察ブースを図 6-14 に示す。評価観察ブース (奥行き 60.0 cm、横 90.0 cm、高さ 116.0 cm) は暗室に設置した。ブースは中央を隔壁で仕切ることによって左右ブース上部に点灯するランプで左右異なる照明条件を設定した。ブースの内面は隔壁を含めて N6 無光沢紙で覆った。

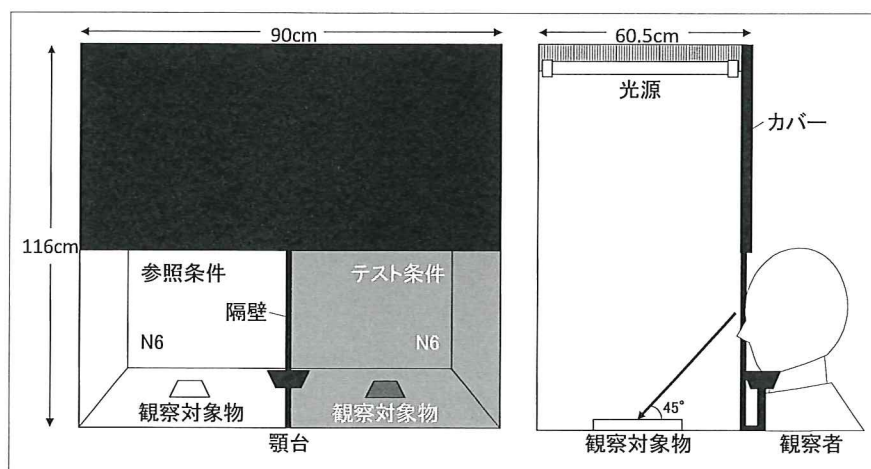


図 6-14 評価観察ブース

(c) 評価形容詞対

評価形容詞対は5章で用いた6種類（“派手な－地味な”、“澄んだ－濁った”、“動的な－静的な”、“明るい－暗い”、“美しい－汚い”、“快適な－不快な”）、及びより客観的に色彩印象を評価するため、納谷ら^(6・23)の実験で用いられた評価形容詞対から「はなやかさの因子」の“軽い－重い”、“暖かさの因子”の“暖かい－涼しい”、さらに辻本ら^(6・24)の実験で用いられた評価形容詞対から“活気のある－活気のない”、“好きな－嫌いな”、“色質”評価において特に重要であると考えられる“鮮やかな－くすんだ”を加えた11種類である（図6-15）。評価尺度は図6-15に示すように「どちらでもない」を中心に両極に「非常に」「かなり」「やや」を配置した7段階評定とした。

		非常に -3	かなり -2	やや -1	どちらでもない 0	やや +1	かなり +2	非常に +3
No.1	地味な							派手な
No.2	濁った							澄んだ
No.3	静的な							動的な
No.4	暗い							明るい
No.5	汚い							美しい
No.6	不快な							快適な
No.7	重い							軽い
No.8	涼しい							暖かい
No.9	活気のない							活気のある
No.10	嫌いな							好きな
No.11	くすんだ							鮮やかな

図 6-15 実験に用いた評価形容詞対（11種類）および7段階尺度

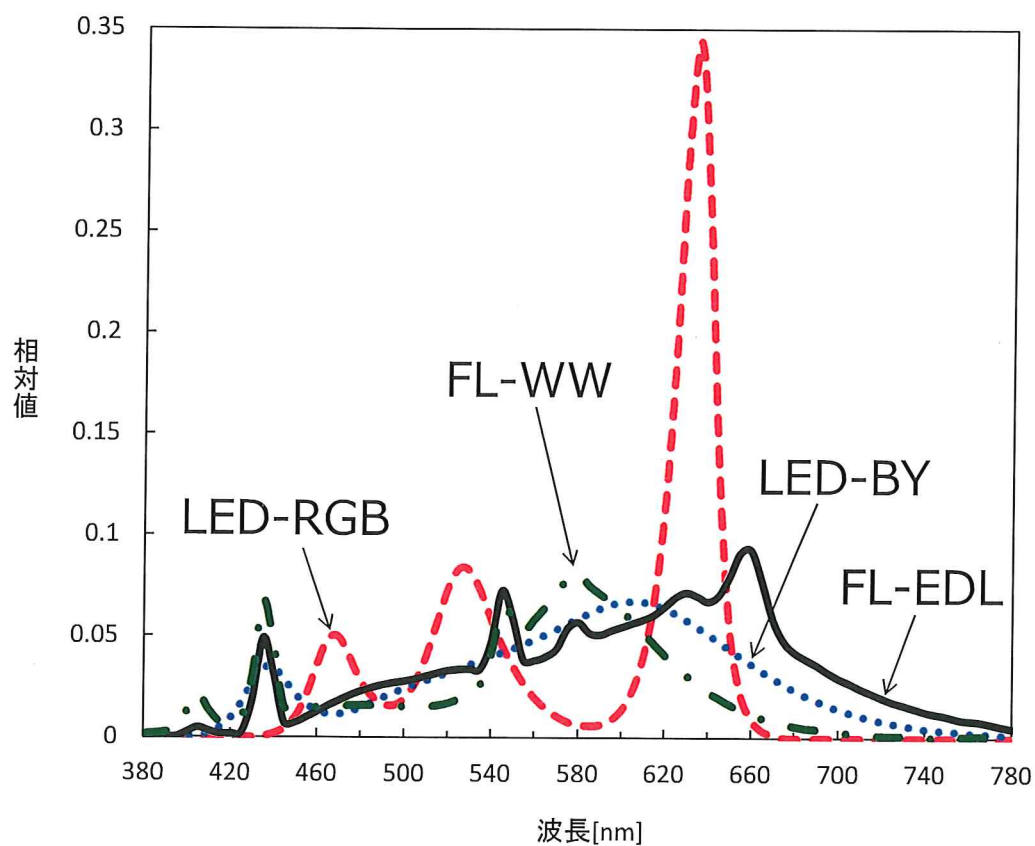


図 6-16 用いた光源の分光分布（同一照度で正規化）

表 6-3 用いた光源の特性値（相関色温度、 R_a 、 R_g 、色度 xy 、偏差 Duv ）

		(CL-500Aによる測定値)						
光源	略称	CCT	R_a	R_g	x	y	Duv	
参照光源	高演色形蛍光ランプ	FL-EDL	3060	96	95	0.435	0.407	0.0018
	高演色形蛍光ランプ	FL-EDL	3060	96	95	0.435	0.407	0.0018
テスト光源	青色LED+黄色蛍光体タイプ	LED-BY	3060	84	19	0.430	0.397	-0.0017
	一般形蛍光ランプ	FL-WW	3460	55	-110	0.411	0.401	0.0030
	赤-緑-青3色タイプ	LED-RGB	3050	21	-172	0.457	0.389	-0.0066

(d) 照明条件

実験に用いた光源の相対分光分布を図 6-16 に示し、特性値（相関色温度、 R_a 、 R_g 、色度 x_y 、偏差 Duv ）を表 6-3 に示し、照明条件を表 6-4 に示す。光色は日本画展示照明を想定し、電球色に設定した。参照光源は美術館・博物館用の高演色形蛍光ランプ（FL-EDL）1 種類である。テスト光源は演色性が対照的な LED ランプ 2 種類（RGB3 色 LED 混光タイプ：LED-RGB、青色 LED 励起黄色蛍光体タイプ：LED-BY）、美術館・博物館用の高演色形蛍光ランプ 1 種類（FL-EDL）、一般形蛍光ランプ 1 種類（FL-WW）の 4 種類である。

照度は左右ブースの机上面照度 700 lx（高照度）、10 lx（低照度）とした。照度の調節は、光源の分光分布が変化しないように黒色木綿ラシャ生地を遮光フィルターとして使用し、重ねの枚数を増減することによって行った。5 章における 2 色配色の主観評価実験では 4 段階の照度レベル（テスト光源の実験照度：700 lx、200 lx、50 lx、10 lx）を用いた。その結果、2 色配色の色彩印象は照度の低下に伴って系統的に低下することを確認したため、本節では最大照度 700 lx、最低照度 10 lx の 2 水準のみを用いることとした。なお参照光源の照度は 700 lx 一定とした。照明条件を変化させた場合はその都度測定を行い、照度の誤差は±1% 以内とした。

表 6-4 照明条件

条件	参照光源		テスト光源		実験条件名
1	700 lx	FL-EDL	700lx	FL-EDL	EDL700
2				LED-BY	BY700
3				FL-WW	WW700
4				LED-RGB	RGB700
5			10lx	FL-EDL	EDL10
6				LED-BY	BY10
7				FL-WW	WW10
8				LED-RGB	RGB10

(e) 実験手順及び教示

実験手順は以下の通りである。

- ① 被験者は暗室に入室後、実験に関する教示を受ける。教示を含め、約 5 分間の暗順応

を行う。

- ② 被験者は実験ブースの中央に着座し、顎台で頭部を固定する。左右の照明条件に対してそれぞれの目を1分から3分間順応させる。
- ③ 実験者が左右のブースの中央に同一の観察対象物を配置する。
- ④ 被験者は左右のそれぞれの眼で観察対象物を視野角斜め上から45°の位置から観察し、実験者が読み上げた評価項目に対して口頭で回答する。回答はすべて実験者が用紙に記録する。
- ⑤ すべての観察対象物の評価が終了すると被験者は実験ブースから離れて待機し、実験者が照度ないしランプを変更した後、再び①からの手順を繰り返す。

①から⑤を1セッションとし、各被験者は8セッション(ランプ4種類×照度2種類=8)を、日を変えランダムな順序で繰り返し3回評価した。

被験者には美術館照明を想定した印象評価実験であることを事前に示し、以下の教示に基づいて評価させた。

「左ブースのサンプルの印象と比較して、右ブースのサンプルの印象がどう見えるかを評価してください。評価の際はサンプルのどこを観察していただいても構いません。サンプル全体から受ける色の印象を答えるようにしてください。正しい答えがあるわけではありません。見たまま、感じたままに直感で答えてください」。

6.3.3 結果及び考察

(a) データ処理

主観評価値は7段階尺度の各尺度間が等間隔であるとみなし、評価尺度に対し+3から-3の数値を与えた。各被験者は1照明条件につき3回の繰り返し評価を行っているため、3回の繰り返し評価の平均値を各被験者の評価値とした。さらに被験者13人の評価値に対する平均値を被験者全平均値とした。

(b) 因子分析

分光分布及び照度が異なる照明下における多色配色(mosaic)の色彩印象の評価構造を明らかにするために、被験者13人の主観評価値を用いて照度ごとに因子分析(主因子法、バリマックス回転)を行った。ここで因子分析を用いたのは11評価形容詞対ごとの評価結果の類似性を解析し、評価形容詞対のグルーピングを行うためである。

全照明条件（光源 4×照度 2×被験者 13=104 データセット）に対する因子分析を行い、異なる照明条件下での色彩印象の評価構造を検討した。表 6-5 に示すように、全照明条件に対する各評価形容詞対の各因子に対する因子負荷量及び寄与率から主な 3 因子を確認した。第 1 因子は「動的な－静的な」、「派手な－地味な」、「鮮やかな－くすんだ」、「活気のある－活気のない」、「澄んだ－濁った」、「暖かい－涼しい」、「明るい－暗い」で表され、寄与率は 41 % であった。第 2 因子は「好きな－嫌いな」、「快適な－不快な」、「美しい－汚い」で表され、寄与率は 26 % であった。第 3 因子は「軽い－重い」、「明るい－暗い」で表され、寄与率は 20 % であった。第 3 因子までの累積寄与率は 87 % であった。

次に、照度の変化によって色彩印象の評価構造が異なるのかを検討するために、照度 700 lx 及び照度 10 lx（各照度：光源 4×照度 1×被験者 13=52 データセット）それぞれに対して因子分析を行った。表 6-6 に照度 700 lx、10 lx の各評価形容詞対の各因子に対する因子負荷量及び寄与率を示す。700 lx では主な 2 因子が抽出され、10 lx では主な 3 因子が抽出された。

700 lx の場合、第 1 因子は「活気のある－活気のない」、「派手な－地味な」などで表され（寄与率 51.49 %）、第 2 因子は「快適な－不快な」、「好きな－嫌いな」で表された（寄与率 23.15 %、第 2 因子までの累積寄与率 74.64 %）。

10 lx の場合、第 1 因子は「鮮やかな－くすんだ」、「派手な－地味な」などで表され（寄与率 45.98 %）、第 2 因子は「美しい－汚い」、「好きな－嫌いな」などで表され（寄与率 26.72 %）、第 3 因子は「暖かい－涼しい」で表された（寄与率 10.59 %、第 3 因子までの累積寄与率 83.28 %）。

因子分析の結果、全照明条件及び各照度に対する因子分析ともに主な 2 因子が抽出されていた。また各因子に含まれている評価形容詞対は表 6-5、表 6-6 に示すように、ほぼ一致している。以上の結果から、各因子を代表すると考えられる主な評価形容詞対を整理した。

整理した評価形容詞対を表 6-7 に示す。第 1 因子は“鮮やかさ”や“派手さ”など色そのものの見えに関係する評価形容詞対が多く含まれていることから“色の質の因子”と解釈した。第 2 因子は、色の“好ましさ”や“美しさ”などより主観的な評価形容詞対が含まれていたことから“好ましさの因子”と解釈した。すなわち、分光分布及び照度が異なる照明下の色彩印象評価は“色の質の因子”及び“好ましさの因子”の主要 2 因子で評価されていることが明らかになった。

表 6-5 全照明条件に対する因子分析結果

評価形容詞対	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”	第3因子 “軽さ”
動的な－静的な	-0.83	0.41	0.35
派手な－地味な	-0.82	0.39	0.40
鮮やかな－くすんだ	-0.79	0.40	0.43
活気のある－活気のない	-0.78	0.40	0.44
澄んだ－濁った	-0.73	0.42	0.48
暖かい－涼しい	-0.68	0.34	0.19
明るい－暗い	-0.66	0.40	0.60
好きな－嫌いな	-0.35	0.83	0.25
快適な－不快な	-0.42	0.76	0.29
美しい－汚い	-0.34	0.66	0.39
軽い－重い	-0.58	0.46	0.61
寄与率	40.95	25.87	20.21
累積寄与率	40.95	66.82	87.03

表 6-6 各照度条件に対する因子分析結果

左：700 lx、右：10 lx

700 lx

評価形容詞対	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”	第3因子
活気のある－活気のない	-0.89	0.32	-0.27
派手な－地味な	-0.88	0.35	-0.29
鮮やかな－くすんだ	-0.87	0.36	-0.28
動的な－静的な	-0.87	0.35	-0.28
明るい－暗い	-0.85	0.44	-0.16
暖かい－涼しい	-0.83	0.41	-0.13
澄んだ－濁った	-0.81	0.42	-0.33
軽い－重い	-0.75	0.40	-0.12
快適な－不快な	-0.39	0.81	-0.20
好きな－嫌いな	-0.39	0.79	-0.21
美しい－汚い	-0.30	0.51	-0.26
寄与率	51.49	23.15	10.31
累積寄与率	51.49	74.64	84.95

10 lx

評価形容詞対	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”	第3因子 “暖かさ”
鮮やかな－くすんだ	-0.91	0.33	-0.16
派手な－地味な	-0.91	0.31	-0.21
活気のある－活気のない	-0.86	0.38	-0.19
動的な－静的な	-0.85	0.33	-0.30
澄んだ－濁った	-0.83	0.38	-0.17
明るい－暗い	-0.76	0.42	-0.27
軽い－重い	-0.71	0.56	-0.17
美しい－汚い	-0.43	0.88	0.00
好きな－嫌いな	-0.27	0.85	-0.18
快適な－不快な	-0.40	0.75	-0.15
暖かい－涼しい	-0.32	0.14	-0.94
寄与率	45.98	26.72	10.59
累積寄与率	45.98	72.69	83.28

表 6-7 各因子を代表する評価形容詞対

因子名	評価形容詞対
“色の質”	鮮やかなーくすんだ
	派手なー地味な
	活気のあるー活気のない
	動的なー静的な
	澄んだー濁った
	明るいー暗い
“好ましさ”	美しいー汚い
	好きなー嫌いな
	快適なー不快な

(c) 主要2因子に対する分光分布及び照度の影響

因子分析の結果、分光分布及び照度が異なる照明下の色彩印象は“色の質の因子”及び“好ましさの因子”の主要2因子で評価できることが明らかになった。次に、これら主要2因子の主観評価結果に対する分光分布及び照度の影響について検討した。

各照明下における各評価形容詞対の主観評価値（被験者全平均）を表 6-8 に示し、標準偏差を表 6-9 に示す。表 6-8 に基づいて作成した主観評価プロフィールを図 6-17 に示す。図 6-17 から明らかなように、主観評価プロフィールは光源及び照度によって異なっており、特に主観評価プロフィールの違いは“色の質の因子”において大きく、“好ましさの因子”やその他の評価形容詞対において小さい。すなわち主観評価に対する光源及び照度の影響は因子によって異なる。

各因子と光源及び照度の関係について因子ごとの特徴を把握するために、各因子を代表する評価形容詞対（“色の質の因子”は「派手なー地味な」、「好ましさの因子」は「快適なー不快な」）を選び、主観評価値と照度との関係を検討した。図 6-18 は各因子の主観評価値と照度の関係である。“色の質の因子”の場合、主観評価値が最も高い LED-RGB と最も低い FL-WW とでは 700 lx でおおよそ 4 段階尺度、10 lx でおおよそ 2.5 段階尺度の開きが認められる。一方“好ましさの因子”の場合、LED-RGB の主観評価値が最も高く、FL-WW が最も低いという相対関係は変わらないが、光源間の差は 700 lx、10 lx ともにおおよそ 2

段階尺度の開きであり、“色の質の因子”ほど大きくない。さらに“色の質の因子”は“好ましさの因子”に比べて照度低下による主観評価値の低下が大きい。これらの評価の傾向は各因子のその他の評価形容詞対でも同様であった。以上から“色の質の因子”は光源及び照度の影響を受けやすい評価尺度といえる。

また“色の質の因子”は、700 lx、10 lxともにLED-RGB (Ra 21) が他のランプ (FL-EDL: Ra 96、LED-BY: Ra 84、FL-WW: Ra 55) よりも高い主観評価値を得ている。これは分光分布、照度が異なる照明下の“色の質の因子”の主観評価が平均演色評価数 Ra と相関しないことを意味している。以上のことから低照度環境の演色性を評価するためには、第4章（等色実験）、第5章（2色配色実験）でも述べたように現行の Ra のみでは不十分であり、 Ra とは別に照度の影響を考慮した評価数が必要であることが明らかになった。

表 6-8 各照明下の主観評価値（被験者全平均）

上段：700 lx、下段：10 lx

因子名		“色の質”						“好ましさ”			その他	
評価形容詞対		鮮やかな/ くすんだ	派手な/ 地味な	活気のある/ 活気のない	動的な/ 静的な	澄んだ/ 濁った	明るい/ 暗い	美しい/ 汚い	好きな/ 嫌いな	快適な/ 不快な	軽い/ 重い	暖かい/ 涼しい
照明 条件	EDL700	0.05	0.05	-0.03	0.05	0.15	0.08	0.69	0.05	0.03	0.15	0.03
	RGB700	2.74	2.54	2.10	2.23	2.10	2.15	1.10	0.64	0.74	1.56	1.59
	BY700	-0.77	-0.85	-0.82	-0.82	-0.67	-0.46	-0.44	-0.28	-0.46	-0.28	-0.72
	WW700	-1.62	-1.59	-1.33	-1.36	-1.64	-1.08	-0.90	-0.90	-0.85	-0.69	-0.69

因子名		“色の質”						“好ましさ”			その他	
評価形容詞対		鮮やかな/ くすんだ	派手な/ 地味な	活気のある/ 活気のない	動的な/ 静的な	澄んだ/ 濁った	明るい/ 暗い	美しい/ 汚い	好きな/ 嫌いな	快適な/ 不快な	軽い/ 重い	暖かい/ 涼しい
照明 条件	EDL10	-2.49	-2.46	-2.23	-2.28	-2.28	-2.44	-1.56	-1.28	-1.31	-2.03	-1.10
	RGB10	-0.36	-0.46	-0.64	-0.21	-0.87	-1.36	-0.44	-0.38	-0.28	-0.87	0.00
	BY10	-2.77	-2.72	-2.44	-2.51	-2.54	-2.79	-1.95	-1.67	-1.67	-2.44	-1.41
	WW10	-2.90	-2.77	-2.69	-2.67	-2.56	-2.72	-1.97	-1.72	-1.72	-2.46	-1.51

表 6-9 各照明下の主観評価値に対する標準偏差

上段：700 lx、下段：10 lx

因子名		“色の質”						“好ましさ”			その他	
評価形容詞対		鮮やかな/ くすんだ	派手な/ 地味な	活気のある/ 活気のない	動的な/ 静的な	澄んだ/ 濁った	明るい/ 暗い	美しい/ 汚い	好きな/ 嫌いな	快適な/ 不快な	軽い/ 重い	暖かい/ 涼しい
照明 条件	EDL700	0.27	0.30	0.37	0.36	0.46	0.49	2.20	0.18	0.29	0.46	0.37
	RGB700	0.43	0.46	0.46	0.46	0.57	0.59	1.22	1.07	1.19	0.60	0.53
	BY700	0.34	0.22	0.32	0.29	0.47	0.63	0.39	0.52	0.37	0.73	0.45
	WW700	0.30	0.39	0.36	0.44	0.35	0.28	0.50	0.28	0.44	0.75	0.50

因子名		“色の質”						“好ましさ”			その他	
評価形容詞対		鮮やかな/ くすんだ	派手な/ 地味な	活気のある/ 活気のない	動的な/ 静的な	澄んだ/ 濁った	明るい/ 暗い	美しい/ 汚い	好きな/ 嫌いな	快適な/ 不快な	軽い/ 重い	暖かい/ 涼しい
照明 条件	EDL10	0.40	0.44	0.34	0.52	0.45	0.42	0.90	0.91	0.93	0.50	1.29
	RGB10	0.95	0.98	0.92	0.96	0.57	0.52	0.74	1.12	0.68	0.54	1.43
	BY10	0.28	0.33	0.44	0.42	0.42	0.32	0.72	1.06	0.88	0.39	1.08
	WW10	0.16	0.34	0.29	0.36	0.34	0.36	0.81	0.94	0.62	0.32	1.09

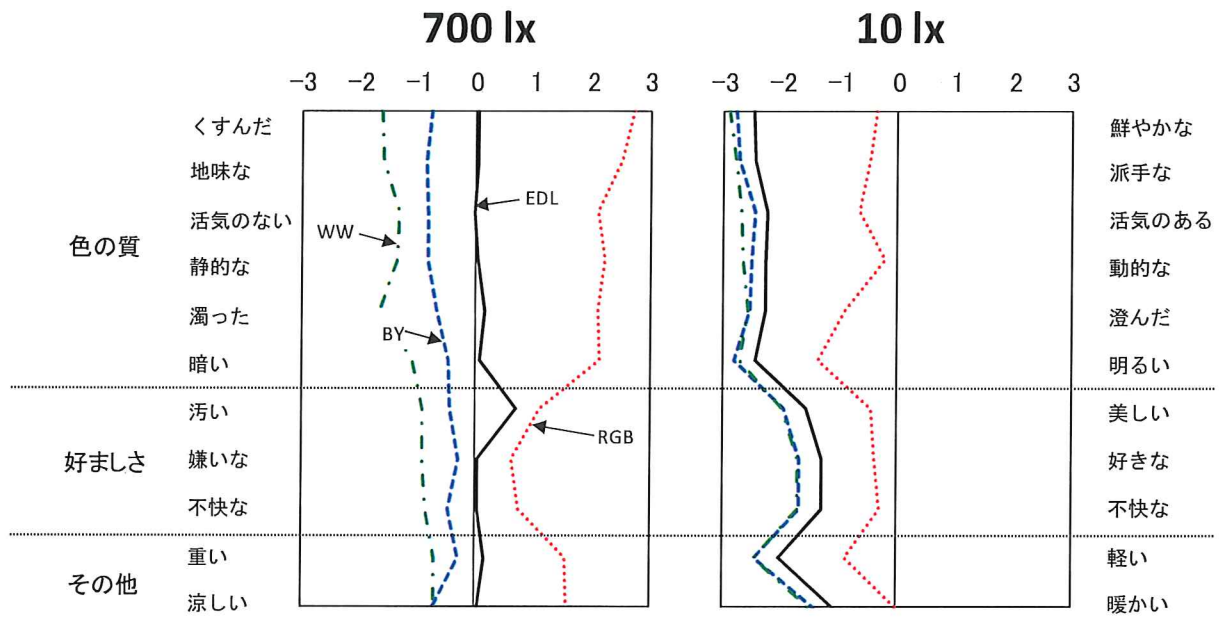


図 6-17 各照明下の主観評価プロフィール（被験者全平均）

左：700 lx、右：10 lx

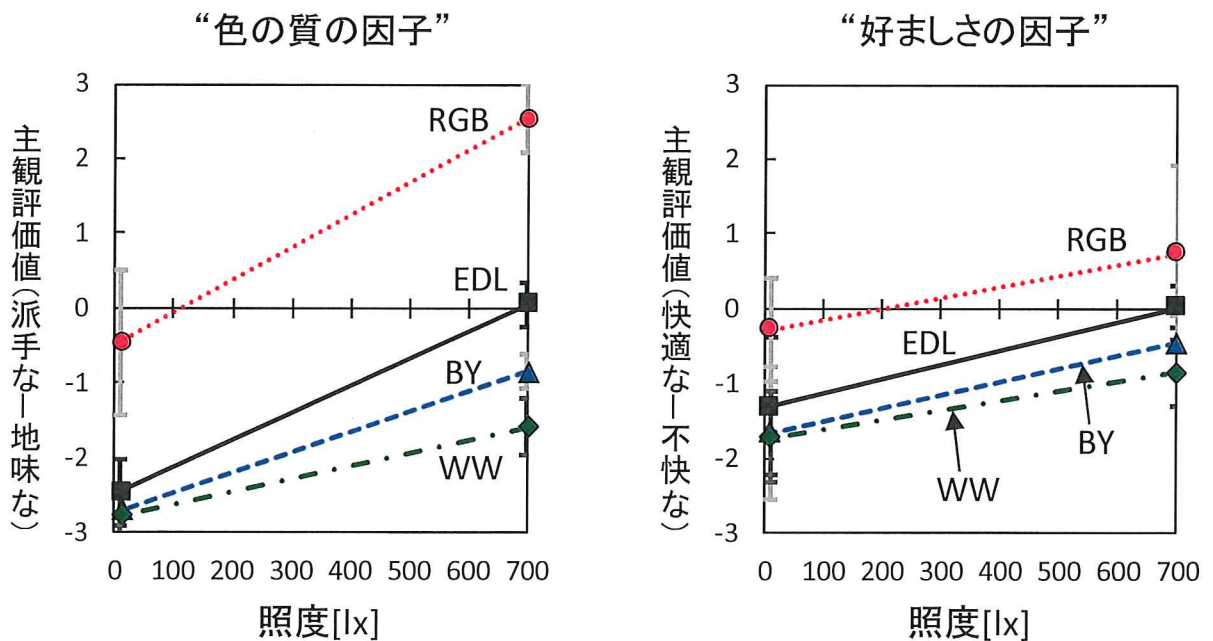


図 6-18 各因子の主観評価値と照度の関係

左：“色の質の因子”「派手な—地味な」、右：“好ましさの因子”「快適な—不快な」

(d) 照度効果を考慮した色の忠実性に基づく演色評価指数と主観評価値の関係

色彩印象に対する因子分析の結果、“色の質の因子”及び“色の質の因子”の主要2因子が抽出され、このうち“色の質の因子”は分光分布及び照度の影響を強く受け、個人差が小さい評価尺度であることがわかった。すなわち異なる照明下での色彩印象は“色の質の因子”で定量的に評価できるが、この“色の質の因子”は照度効果が考慮されていない Ra とは対応しない。

次に Ra を代表とする色の忠実性に基づく数種の演色性評価方法に照度効果を追加した演色評価指数(①～④)を検討し、“色の質の因子”の主観評価結果との対応関係を確認した。

第2章 2.1.1 項で示したように、現行演色評価方法で用いられている均等色空間 CIE1964 $U^*V^*W^*$ は旧式の色空間であり、現在国際標準とはなっていない。また von Kries 色順応補正式は旧式の色順応補正式である。これらには照度の効果が一切含まれていない。分光分布及び照度が異なる照明下の演色性を評価するには、輝度及び照度の影響を含めた色の見えを予測できる色空間が必要である。本項では現在進められている新しい演色性評価方法にも導入が検討されている色の見えモデル CIECAM02 (Color Appearance Model) ⁶⁻²⁵⁾ を用いて、照度効果を考慮した演色評価指数を算出する。計算評価に用いた指標は以下の①～④である。

① Ra (J-aMbm)

② Ra (Q-aMbm)

③ Ra (CRI-CAM02UCS)

④ Ra ($Ra, 2012$)

演色評価指数を算出するときに用いたテスト光源は 6.3.2 項 (d) の主観評価試験に用いた4種類 (FL-EDL、LED-BY、FL-WW、LED-RGB) であり、照度は 700、200、50、10 lx の4段階とした。演色評価指数を算出するときの基準光源は各テスト光源の相関色温度と同じ色温度とし、照度は 700 lx 固定とした。計算に用いた照明条件をを表 6-10 に示す。演色評価指数を算出するときの CIECAM02 入力パラメータを表 6-11 に示し、照度に対する輝度の換算値を表 6-12 に示す。

演色評価指数を算出するための試験色は CIE/JIS 試験色 8 色 (No.1～No.8) とし (第2章 表 2-1、図 2-2、図 2-3 参照)、等色関数は CIE 1964 標準観測者 (10 度視野等色関数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$) を用い、波長は 400-700 nm、5 nm 間隔とした。

表 6-10 計算に用いた照明条件

条件	基準光源		テスト光源		照明条件名
1	700 lx	P3060	700 lx	FL-EDL	EDL700
2			200 lx		EDL200
3			50 lx		EDL50
4			10 lx		EDL10
5		P3060	700 lx	LED-BY	BY700
6			200 lx		BY200
7			50 lx		BY50
8			10 lx		BY10
9		P3460	700 lx	FL-WW	WW700
10			200 lx		WW200
11			50 lx		WW50
12			10 lx		WW10
13		P3050	700 lx	LED-RGB	RGB700
14			200 lx		RGB200
15			50 lx		RGB50
16			10 lx		RGB10

表 6-11 CIECAM02 入力パラメータ

F	1.00
D	0.91
Yb	20.00
c	0.69
Nc	1.00

表 6-12 照度に対する輝度の換算値

照度(lx)	LA(cd/m2)
700	44.56
200	12.73
50	3.18
10	0.64

$Ra_{(J-aMbM)}$ 及び $Ra_{(Q-aMbM)}$ は、現行 Ra の計算式は変えず、色順応式を von Kries 色順応式から CAT02 (CIE が 2002 年に勧告した色順応補正式)⁶⁻²⁶⁾ へ変更し、また色空間を均等色空間 CIE1964 $U^*V^*W^*$ から CIECAM02 の $J-aMbM$ または $Q-aMbM$ 色空間に変更し、現行演色性評価方法の式を用いて計算したものである。

$Ra_{(J-aMbM)}$ は (6-1) 式、(6-2) 式、(6-4) 式によって算出し、 $Ra_{(Q-aMbM)}$ は (6-1) 式、(6-3) 式、(6-4) 式によって算出した。

$$Ri_{(CAM02)} = 100 - 4.6\Delta E_i \dots\dots\dots (6-1)$$

$$\Delta E_i = \sqrt{((\Delta J)^2 + (\Delta a_M)^2 + (\Delta b_M)^2)} \dots\dots\dots (6-2)$$

$$\Delta E_i = \sqrt{((\Delta Q)^2 + (\Delta a_M)^2 + (\Delta b_M)^2)} \dots\dots\dots (6-3)$$

$$Ra_{(CAM02)} = \sum R_i / 8 \dots\dots\dots (6-4)$$

Ra(CRI-CAM02UCS)は、CIE 技術委員会 TC1-69（白色光源の演色性）に提案された新しい演色性評価方法のひとつである CRI-CAM02UCS⁶⁻²⁷⁾ に基づいて算出する。CRI-CAM02UCS とは、色順応式を CAT02 に変更し、色空間を均等色空間である CAM02-UCS⁶⁻²⁸⁾ へ変更したものである。

Ra(CRI-CAM02UCS)は、色空間 CIECAM02 である J 値、M 値、a_M 値、b_M 値を (6-6) 式～(6-8) 式によって均等色空間 CAM02-UCS である J' 値、M' 値、a' 値、b' 値へ補正した後、Ri(CRI-CAM02UCS)は (6-5) 式、(6-10) 式、Ra(CRI-CAM02UCS)は (6-11) 式によって算出した。係数 k は CIE の代表的な測色用蛍光ランプ (F1～F12) のひとつである F4 に対する Ra(CRI-CAM02UCS)が 51 となるよう定め、k=20.0 とした。

$$Ri_{(CRI-CAM02UCS)} = 100 - k \sum E(CAM02 - UCS)_i \dots\dots\dots (6-5)$$

$$k = 20.0$$

$$J' = (1 + 100 * 0.007) * J / (1 + 0.007 * J) \dots\dots\dots (6-6)$$

$$M' = (1/0.0228) * \ln(1 + 0.0228 * M) \dots\dots\dots (6-7)$$

$$a' = M' * \cos(h * \pi / 180) \dots\dots\dots (6-8)$$

$$b' = M' * \sin(h * \pi / 180) \dots\dots\dots (6-9)$$

$$\Delta E' = \sqrt{((\Delta J')^2 + (\Delta a')^2 + (\Delta b')^2)} \dots\dots\dots (6-10)$$

$$Ra_{(CRI-CA02UCS)} = \sum R_i / 8 \dots\dots\dots (6-11)$$

$Ra_{(Ra,2012)}$ は、CRI-CAM02UCS の修正改良版である $Ra_{,2012}^{6-29)}$ に基づいて計算したものであり、(6-12) 式、(6-13) 式によって算出する。なお (6-13) 式の係数 k は F1~F12 に対し、 $Ra_{(Ra,2012)} 1\sim12$ 及び現行 $Ra_{1\sim12}$ を求め、各々の平均値が等しくなるよう (6-14) 式によって定め、 $k=1/22$ とした。

$$\Delta E_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta E_i^2 / N} \dots\dots\dots (6-12)$$

$$Ra_{(Ra,2012)} = 100 * (2 / e^{k * |\Delta E_{rms}| 1.5 + 1}) \dots\dots\dots (6-13)$$

$$Ra_{(Ra,2012)} (\sum Fi/12) = Ra (\sum Fi/12) \dots\dots\dots (6-14)$$

表 6-13 に各照明条件下における評価指数の計算結果を示す。図 6-19 は表 6-13 に基づいて作成した各演色評価指数と照度の関係である。表 6-13 及び図 6-19 に示されるように、各演色評価指数は照度が低下することによって低下する。しかし、各演色評価指数と照度の関係は、 Q 値（ブライトネス）を用いた場合（指標①）と J 値（ライトネス）を用いた場合（指標②、③、④）で大きく異なっていることがわかる。その理由は、CIECAM02 の J 値による演色評価指数の場合、照度に対して J 値の変化が極めて小さいため、結果的に amb_M 値の変化で値がほぼ決まるのに対して、 Q 値を用いた演色評価指数では Q 値が照度によって大きく変化するため値はほぼ Q 値で決まるからである。従って Q 値を用いた場合（指標①）、700 lx 以下はすべての光源の値が負値となり、光源間の演色評価指数の差も僅かとなる。 J 値を用いた場合（指標②、③、④）、光源によって演色評価指数は異なり、特に LED-RGB は他の光源とは異なる傾向を示し、照度が低下することによって演色評価指数が若干高くなるという結果を示した。

次に主観評価値に対する Q 値を用いた演色評価指数（指標①）、 J 値を用いた演色評価指数（指標④）との関係を検討した。図 6-20 に Q 値を用いた演色評価指数（指標①）と“色の質の因子”を代表する「派手な一地味な」の主観評価値との関係を示す。縦軸は主観評価値、横軸は演色評価指数である。両者の相関係数は 0.81 と高いが、上述したように 700 lx

以下ではすべての光源の値が負値となることや、主観評価結果に比べて光源間の演色評価指数の差が僅かであることなど問題点が多い。

図 6-21 は J 値を用いた場合であり、相関係数は 0.14 と低く、主観評価と対応しないことが明らかである。この傾向は他の J 値を用いた演色評価指数 (②、③) においても同様であった。

以上のことから、分光分布、照度が異なる照明下の色の見えは、照度効果を付加した色の忠実性に基づく演色評価指数と対応しないことが明らかになった。

表 6-13 各照明条件下における照度を考慮した色の忠実性に基づく演色評価指数の計算結果 (R_a を付記する)

光源 (CCT)	照明条件	R_a	① $R_{a(Q-aMbm)}$	② $R_{a(J-aMbm)}$	③ $R_{a(CRI-CAM02UCS)}$	④ $R_{a(Ra2012)}$
FL-EDL (3060K)	EDL 700lx	96	95	96	88	98
	EDL 200lx		-52	88	72	92
	EDL 50lx		-179	76	46	70
	EDL 10lx		-286	63	18	64
LED-BY (3060K)	BY 700lx	84	86	86	63	88
	BY 200lx		-53	84	49	80
	BY 50lx		-180	74	26	68
	BY 10lx		-287	62	1	54
FL-WW (3500K)	WW 700lx	55	69	70	15	56
	WW 200lx		-57	70	-4	49
	WW 50lx		-183	64	-20	40
	WW 10lx		-288	54	-39	32
LED-RGB (3060K)	RGB 700lx	21	53	53	-30	38
	RGB 200lx		-53	50	-5	49
	RGB 50lx		-178	54	17	60
	RGB 10lx		-284	56	29	65

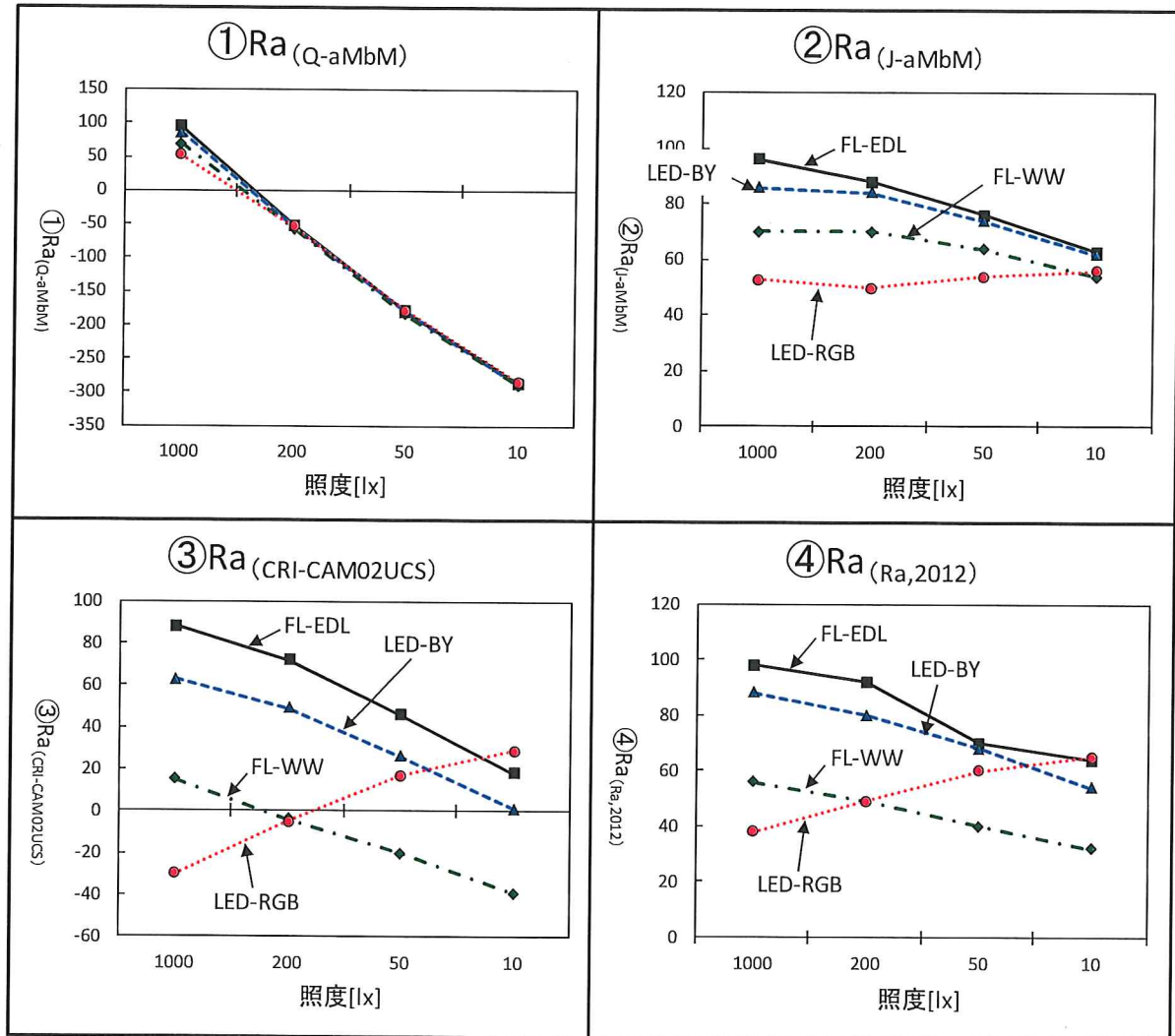
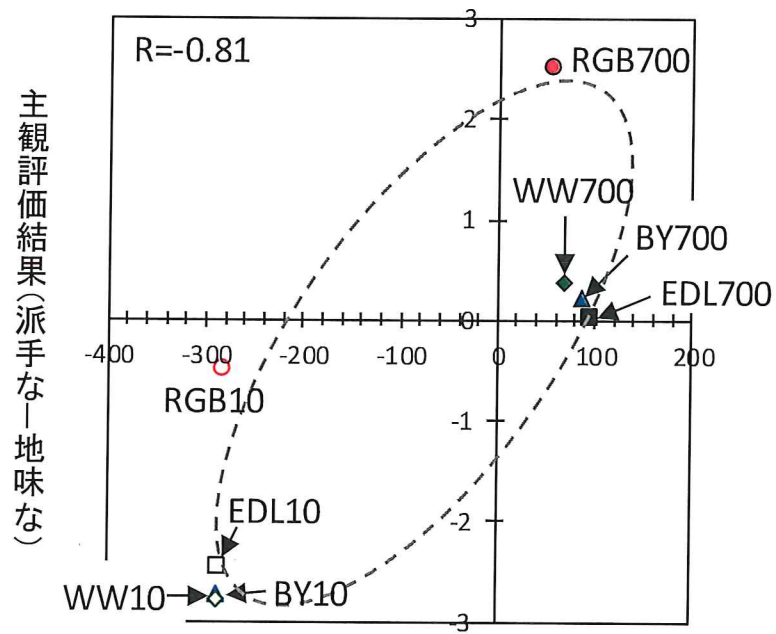


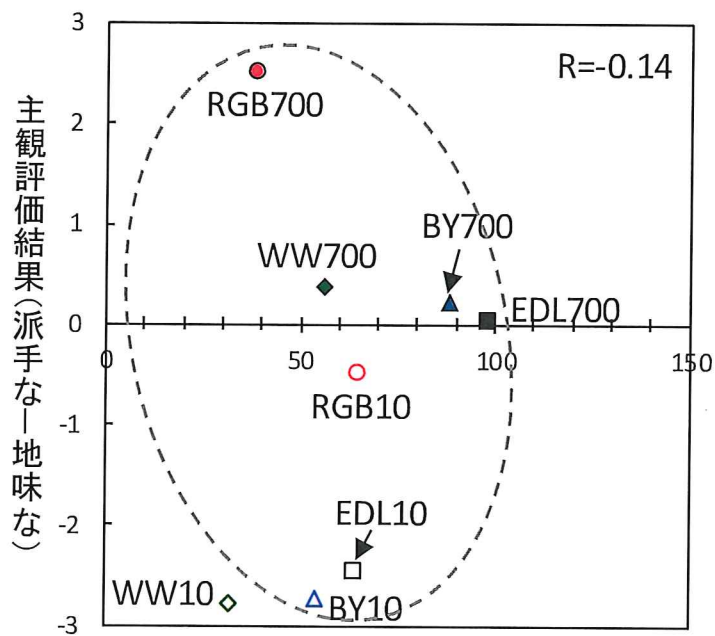
図 6-19 照度効果を考慮した各演色評価指数と照度の関係



照度効果を考慮した演色評価指数① $Ra_{(Q-aMbM)}$

図 6-20 「派手な-地味な」の主観評価値と

照度効果を考慮した演色評価指数 $Ra_{(Q-aMbM)}$ の関係



照度効果を考慮した演色評価指数④ $Ra_{,2012}$

図 6-21 「派手な-地味な」の主観評価値と

照度効果を考慮した演色評価指数 $Ra_{(Ra,2012)}$ の関係

(e) 照度効果を考慮した色域面積に基づく演色評価指数と主観評価値の関係

色域面積比、及び目立ち指数に基づく数種の演色性評価方法に照度効果を追加した演色評価指数(⑤～⑧)を検討し、“色の質の因子”の主観評価結果との対応関係を確認した。

色域面積比(GR: Gamut Ratio)とは、ある基準光で照明された複数の試験色の測色座標値を囲む面積(GR)を100としたときの、試料光源下での同面積(GT)を比率としてあらわしたものである。

目立ち指数(FCI: Feeling of Contrast Index)とは、橋本らによって提案された“目立ち感”に基づく演色性評価方法であり、基準光源(D65)及びテスト光源下での赤色・黄色・緑色・青色の4色配色から受ける目立ち感を数値化したものである^{6,30)}。目立ち感とは、演色性の変化によって有彩色物体群(配色)から受ける“目立つ - 目立たない”といった感情である。計算評価に用いた指標は以下の⑤～⑧である。

⑤GR (aMbM)

⑥FCI (J-aCbC)

⑦FCI (J-aMbM)

⑧FCI (Q-aMbM)

演色評価指数を算出するときに用いたテスト光源は6.3.2項(d)の主観評価実験に用いた4種類(FL-EDL、LED-BY、FL-WW、LED-RGB)であり、照度は700、200、50、10 lxの4段階とした。演色評価指数を算出するときに用いた基準光源はGR (aMbM)とFCI (J-aCbC)、FCI (J-aMbM)、FCI (Q-aMbM)によって異なり、GRは主観評価実験の参照光源であるFL-EDLとし、FCIはD65とした。基準光源の照度はGR、FCIともに700 lx固定とした。計算に用いた照明条件をを表6-14に示す。演色評価指数を算出するときのCIECAM02入力パラメータ、及び照度に対する輝度の換算値は6.3.3項(c)照度効果を考慮した色の忠実性に基づく演色性評価指数と主観評価値の関係で示した表6-11、表6-12と同様である。

演色評価指数を算出するための試験色はGRとFCIによって異なり、GRはCIE/JIS試験色8色(No.1～No.8)とし(第2章 表2-1、図2-2、図2-3参照)、FCIは規定の赤色・黄色・緑色・青色の4色配色を用いた(第2章 図2-6参照)。なお等色関数はCIE 1964標準観測者(10度視野等色関数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$)を用い、波長は400-700 nm、5 nm間隔とした。

表 6-14 計算に用いた照明条件

左：GR（指標①）算出に用いた条件

条件	基準光源	テスト光源	照明条件名
1	700 lx	700 lx FL-EDL	EDL700
2			EDL200
3			EDL50
4			EDL10
5		700 lx LED-BY	BY700
6			BY200
7			BY50
8			BY10
9		700 lx FL-WW	WW700
10			WW200
11			WW50
12			WW10
13		700 lx LED-RGB	RGB700
14			RGB200
15			RGB50
16			RGB10

右：FCI（指標⑥～⑧）算出に用いた条件

条件	基準光源	テスト光源	照明条件名
1	700 lx D65 6500K	700 lx FL-EDL	EDL700
2			EDL200
3			EDL50
4			EDL10
5		700 lx LED-BY	BY700
6			BY200
7			BY50
8			BY10
9		700 lx FL-WW	WW700
10			WW200
11			WW50
12			WW10
13		700 lx LED-RGB	RGB700
14			RGB200
15			RGB50
16			RGB10

GR_(aMbM) は、CIECAM02 の aMbM 2 次元色空間を用いて (6-16) 式によって計算した。
G (T_E) とはテスト光源 T の照度 E lx 照明下での色域面積であり、G (R_E) とは基準光源
R の照度 E lx 照明下での色域面積である。

$$GR_{(aMbM)} = [G(T_E) / G(R_E)] \times 100 \text{-----} (6-16)$$

FCI は、CIELAB の 3 次元色空間上 ($L^*a^*b^*$) において赤色サンプルを基準とする色域
面積（赤色、黄色、緑色の三角形の面積と赤色、青色、緑色の三角形の面積の和）を用いる
が、本項では照度効果を入れるため CIECAM02 の色空間を用いて色域面積を求めた。

FCI_(J-aCbC)、FCI_(J-aMbM)、FCI_(Q-aMbM) は、各カッコ内の色空間を用いて (6-17) 式～ (6-19)
式によって算出した。(6-17) 式～ (6-19) 式の G (T_E) とはテスト光源 T の照度 E lx 照
明下での色域面積であり、G (D65_E) とは基準光源 D65 の照度 E lx 照明下での色域面積で
ある。

$$FCI_{(J-aCbC)} = [G(T_E) / G(D65_E)]^{1.5} \times 100 \text{-----} (6-17)$$

$$FCI_{(J-aMbM)} = [G(T_E) / G(D65_E)]^{1.5} \times 100 \text{-----} (6-18)$$

$$FCI_{(Q-aMbm)} = [G(T_E) / G(D65_E)]^{1.5} \times 100 \text{-----} (6-19)$$

表 6-15 に各照明条件下における評価指数の計算結果を示す。図 6-22 は表 6-15 に基づいて作成した各演色評価指数と照度の関係である。表 6-15 及び図 6-22 に示すように、各演色評価指数はどの光源においても照度が低下することによって系統的に値が減少している。

次に照度を考慮した上述の演色評価指数の計算値と主観評価値との関係を検討した。図 6-23 に“色の質の因子”を代表する「派手な－地味な」の主観評価値と照度効果を考慮した演色評価指数 $GR_{(aMbm)}$ の関係を示す。縦軸は主観評価値、横軸は演色評価指数である。主観評価値と演色評価指数は 0.91 と高い相関を示し、“色質の因子”に対する主観評価結果と照度効果を考慮した演色評価指数 $GR_{(aMbm)}$ に対応があることが明らかである。 $FCI_{(J-aMbm)}$ 、 $FCI_{(Q-aMbm)}$ については主観評価結果と比較的良好な対応関係であることを確認した。 $FCI_{(J-aCbC)}$ は主観評価値との相関が低く、その理由は J 値、ac 値、bc 値が照度の影響をほぼ受けず、照度によって演色評価指数が変化しないためである。

以上から、分光分布、照度が異なる照明下の“色の質の因子”の評価は、照度効果を付加した J 値、aM 値、bM 値を用いた色域面積に基づく評価指数で表すことができる可能性がある。

表 6-15 各照明条件下における照度を考慮した GR および FCI に基づく演色評価指数の計算結果（橋本らの FCI 値⁶⁻³⁰⁾を付記する）

光源 (CCT)	照明条件	FCI	⑤ $GR_{(aMbm)}$	⑥ $FCI_{(J-aCbC)}$	⑦ $FCI_{(J-aMbm)}$	⑧ $FCI_{(Q-aMbm)}$
FL-EDL (3060K)	EDL 700lx	130	100	121	122	122
	EDL 200lx		79	120	94	79
	EDL 50lx		62	119	72	49
	EDL 10lx		47	118	53	29
LED-BY (3060K)	BY 700lx	116	97	109	109	109
	BY 200lx		77	108	84	70
	BY 50lx		61	107	64	44
	BY 10lx		46	105	47	26
FL-WW (3500K)	WW 700lx	80	79	77	77	77
	WW 200lx		62	76	59	49
	WW 50lx		49	75	45	31
	WW 10lx		37	74	33	19
LED-RGB (3060K)	RGB 700lx	201	114	177	177	178
	RGB 200lx		90	176	138	115
	RGB 50lx		71	175	105	72
	RGB 10lx		54	173	78	43

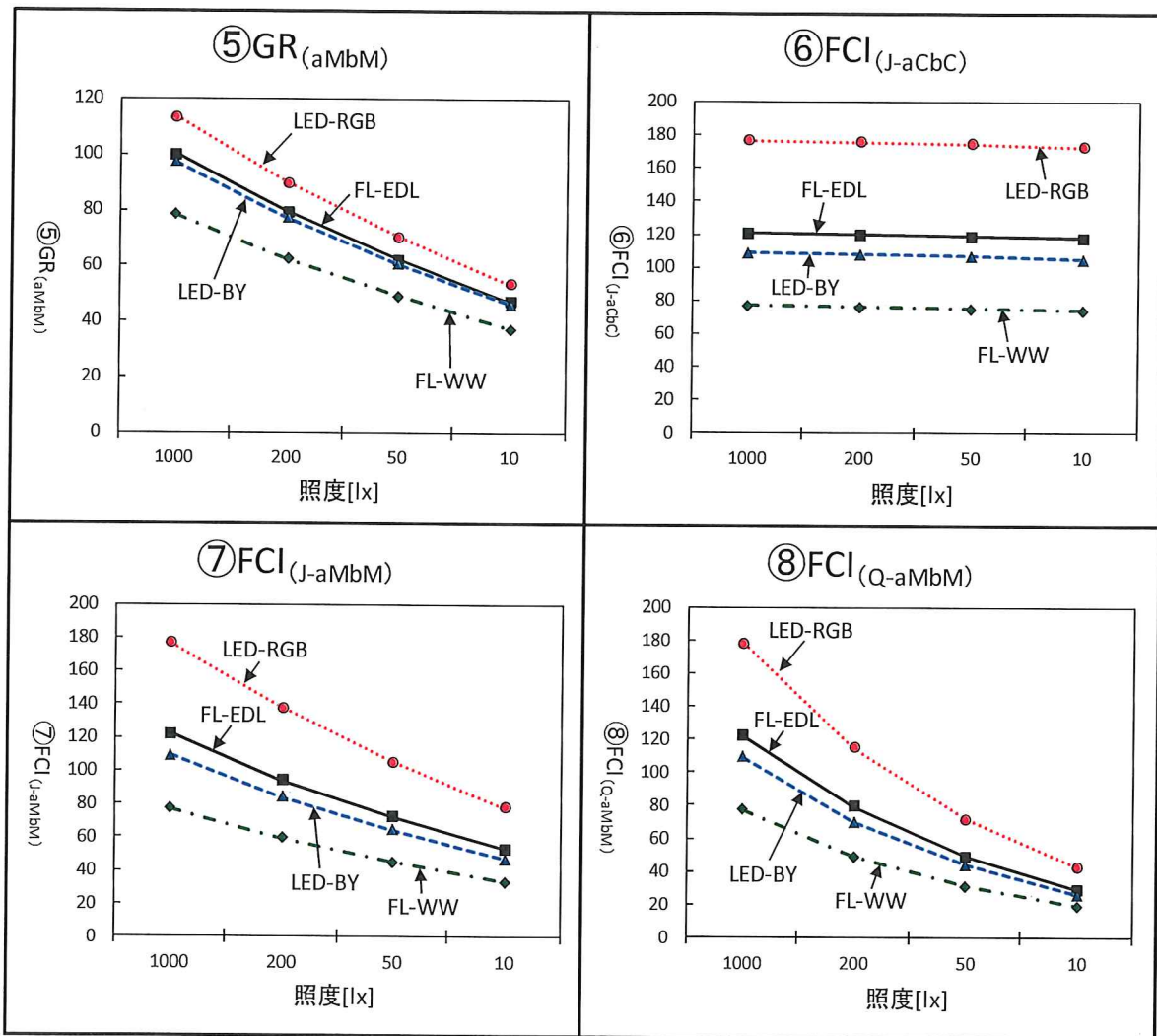


図 6-22 照度効果を考慮した各演色評価指数と照度の関係

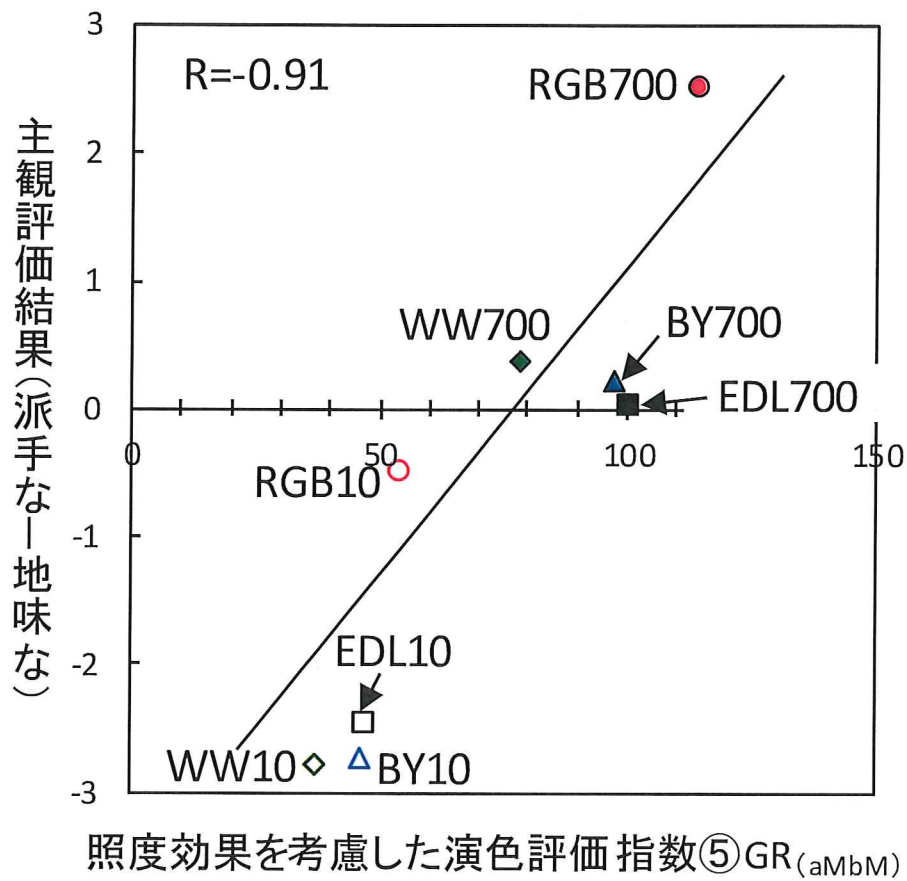


図 6-23 “派手な-地味な”の主観評価値と
照度効果を考慮した演色評価指数 $GR_{(aMbM)}$ の関係

6.4 「色質」の定義

第 6.3 節の結果から「色質」を定義する。

色彩印象評価結果に対する因子分析解析から主要 2 因子、“色の質の因子”、及び“好ましさの因子”が抽出され、異なる照明下における色彩印象はこの 2 因子で評価できることが明らかになった。

また“色の質の因子”は“好ましさの因子”に比べ、分光分布及び照度の影響を強く受ける評価尺度であることがわかった。すなわち“色の質の因子”は異なる照度下の光源の演色性の違いを効果的かつ定量的に評価することができると解釈できる。

さらに“色の質の因子”は、照度効果を考慮した色域面積に基づく演色評価指数と対応することが明らかになった。すなわち“色の質の因子”は色の明るさ、鮮やかさなど色のボリュームによって推定できる可能性がある。

以上から、分光分布、照度の異なる照明下での有彩色物体の色の見えに最も影響するのは“鮮やかさ”や“明るさ”に基づく“色の質の因子”に関係する評価形容詞対であることが明らかであり、「色質」を次のように定義した。

色質

「高照度から低照度に設定される美術館照明下の作品鑑賞の視点において、知覚的な鮮やかさ、明るさに基づく色の見えの印象が最低限補償されることによって生じる満足感（色の全体印象、色の豊富さ）に対応する尺度」

「色質」を表す主な評価形容詞対については表 6-7 にも示したように“鮮やかさ”や“明るさ”に関連する「鮮やかなーくすんだ」、「派手なー地味な」、「活気のあるー活気のない」、「動的なー静的な」、「澄んだー濁った」、「明るいー暗い」が挙げられ、これらを用いることによって評価できる。

6.5 結論

本章では分光分布、照度が異なる照明下における多色配色 (mosaic) の主観評価実験から、色彩印象に対する分光分布と照度の関係を検討し、美術館照明を想定した色の見えに基づく「色質」の評価構造を因子分析により解析した。その結果、以下のことが明らかになった。

1. 異なる照明下での色彩印象は“色の質の因子”と“好ましさの因子”の主要 2 因子で評

価できる。

2. “色の質の因子” は分光分布及び照度の影響を強く受けることから、異なる照度下における演色性の評価に適した評価尺度である。
3. “色の質の因子” は、照度効果を考慮した色の忠実性に基づく演色評価指数と対応しない。
4. “色の質の因子” は、照度効果を考慮した色域面積に基づく演色評価指数と対応する。
5. 高照度から低照度に設定される美術館照明下での作品鑑賞の視点での色の見えの印象は、「高照度から低照度に設定される美術館照明下の作品鑑賞の視点において、知覚的な鮮やかさ、明るさに基づく色の見えの印象が最低限補償されることによって生じる満足感（色の全体印象、色の豊富さ）に対応する尺度」で表され、それを「色質」と定義する。

第 7 章

「色質」の主観評価に対する観察対象物の影響

第7章 「色質」の主観評価に対する観察対象物の影響

7.1 はじめに

第5章では2色配色を用いて分光分布及び照度が異なる照明下で主観評価実験を実施し、「派手な—地味な」、「澄んだ—濁った」、「動的な—静的な」、「明るい—暗い」の評価は分光分布、照度、及び2色配色構成色の影響を受け、特に赤色が含まれる2色配色の場合に光源間の評価の差が大きくなることを明らかにした。

第6章では多色配色を用いて異なる照明下で主観評価実験を行い、異なる照明下の多色配色から受ける色彩印象が“色の質の因子”で定量的に評価できることを明らかにした。また“色の質の因子”を「高照度から低照度に設定される美術館照明下の作品鑑賞の視点において、知覚的な鮮やかさ、明るさに基づく色の見えの印象が最低限補償されることによって生じる満足感（色の全体印象、色の豊富さ）に対応する尺度」と定義した。

第5章で示した2色配色構成色の影響を受けやすい評価形容詞対「派手な—地味な」、「澄んだ—濁った」、「動的な—静的な」、「明るい—暗い」は、第6章で定義した「色質」を表す評価形容詞対にも含まれており、すなわち「色質」は観察対象物の色の影響を受けることが予測される。

これまでの演色性及び色の見えに関する諸研究においても、主観評価が観察対象物の特性、すなわち観察対象物の種類 7-1) ~7-4)、色相 7-5) ~7-13)、鮮やかさ 7-14) ~7-15)、面積 7-16) ~7-18) などの影響を受けることが報告されているが、それらの研究は数百 lx の高照度条件下で実験が行われており、美術館日本画展示照度レベルのような低照度下での実験は行われていない。従って分光分布及び照度が異なる照明下において観察対象物の違いが主観評価にどのように影響するのかは明らかではない。

美術館ではさまざまな色や画材を持つ美術作品が展示されるが、そのすべてを個別に評価することは難しい。従って美術館照明を評価するためには、照度、分光分布、観察対象物の影響を考慮して「色質」を定量化する必要がある。

本章では、観察対象物の種類、色相、鮮やかさ、面積などを含めて観察対象物の“色彩特性”とし、その“色彩特性”と「色質」の関係を明らかにする。

実験1は、「色質は観察対象物に含まれる色相によって変化する」と仮説を立て、「色質」の評価に対して、黄みの赤色や紫みの赤色など観察対象物の赤色の色相の違いや、黄色や青色などその他の色相がどのような影響を与えるのかを検討した。

実験2は、「色質は観察対象物に含まれる赤色の有無によって変化する」と仮説を立て、

赤色を含む観察対象物と赤色を含まない観察対象物を用いて、「色質」の評価が観察対象物に含まれる赤色の有無によってどのように変化するかを検討した。さらに観察対象物の種類及び画材の違いが「色質」の評価に影響するか否かも併せて検討した。

実験3は、「色質は観察対象物に含まれる赤色の面積率によって変化する」と仮説を立て、観察対象物に含まれる赤色の面積率を段階的に変化させ、赤色の面積率の違いが「色質」の評価に対してどのような影響を与えるのかを検討した。

7.2 実験1（観察対象物に含まれる色相の影響）

7.2.1 はじめに

演色性評価が観察対象物の色相に依存することは多くの研究で論じられ、特に観察対象物中の赤色の色再現が重要であることが報告されている^{7-5)~7-13)}。

神部らは⁷⁻⁶⁾、快適性に対する演色性と照度の影響を検討し、異なる照明下でトマトやレモンなど熟知物の評価を行った。その結果、トマトの評価は演色性の影響を受けるが、レモンの評価は演色性の影響を受けないなど、観察対象物及びその色相によって演色性の影響の程度が異なることを明らかにした。

乾らは⁷⁻⁶⁾、住宅居間の照明に対する快適性について検討し、異なる演色性、照度の照明下で観葉植物や赤りんごなど熟知物の“自然さ”、“快適さ”を評価した。その結果、赤りんごや牛肉など赤色系統の観察対象物は黄色や緑色の観察対象物よりも演色性の影響を受けやすいことを明らかにしている。

橋本らは⁷⁻⁷⁾、目立ち感に基づく演色性評価方法を提案しており、演色性の変化によって最も目立ち感情が変化するのは片側に高彩度の赤色を含む2色配色であること、黄色を含む2色配色は個人差が大きく目立ち感情にばらつきがあること、その他の色相で構成された2色配色は演色性の変化によって目立ち感情がほとんど変化しないことを示した。

Reaらは⁷⁻⁸⁾、光色（2種類：暖色系 3157 K~3732 K、寒色系 5069 K~6682 K）、演色性の異なるランプ（LED ランプ、蛍光ランプ）及び異なる照度（500、50 lx）下で、6種類の写真（赤色系の写真、青色系の写真、人物の写真）に対する全体、赤色、青色の“vividness”（鮮やかさ）を経時比較により評価した。その結果、光色が暖色系のランプの場合、寒色系のランプよりも赤色がより“vividness”に評価されること、さらに観察対象物全体の“vividness”が赤色の演色色再現に基づいて評価されていることを明らかにした。

Jost-Boissardらは⁷⁻⁹⁾、同時比較法を用いて、異なるランプ下での4種類の青果物群（多色系、赤色系、緑色系、黄色系）それぞれに対する“attractive”（魅力的な）、“natural”

(自然な)、“suitable”(適切な)を強制選択法で評価した。参照光源はハロゲンランプ及び高演色形蛍光ランプ、テスト光源は演色性の異なる混光白色LEDランプ6種類である。その結果、評価に対する観察対象物の色の影響は僅かではあるものの、多色系の青果物群の評価は赤色系の青果物群の評価の傾向と一致しており、また多色系の青果物群を評価する場合、最も評価に影響した色は赤色系の果物であったとの被験者の内観報告を述べている。

Reaらは⁷⁻¹⁰⁾、光色(2種類 2800 K~3200 K、4500 K~4800 K)、演色性の異なる混光ランプ(ハロゲンランプ+BYタイプLEDランプ2種類+単色LED6種類の混光)で青果物(洋ナシ、オレンジ、バナナ、イチゴ、ブルーベリー、ブドウ、緑・赤・オレンジピーマン、レモン)及び色票(x-rite カラーチェッカー)全体の“natural”、“vivid”をマグニチュード推定法(magnitude estimation)で評価させ、各照明下での有彩色物体群に対する“acceptable”(許容度)を“yes”、“no”で評価させた。さらに上記の評価に影響した色の順位を上位3位まで回答させた。その結果、“natural”、“vivid”、“acceptable”の評価に最も影響を及ぼした色は赤色であり、次いで黄色、オレンジ色であり、黄緑色から紫色はほとんど影響がないことを明らかにした。

Nakashimaらは⁷⁻¹¹⁾、自然物を好ましく見せる混光白色LEDの分光分布を明らかにするために、白色蛍光ランプ下の各自然物(赤リンゴ、桃、オレンジ、バナナ)と比較して、演色性の異なる8種類の混光白色LEDランプ下で観察する各自然物の“deliciousness”(美味しそうな)、“naturalness”、“vividness”、“safety”(安全な)、“suitableness”、“appetite of consumer”(食欲がわく)を7段階尺度で評価させた。その結果、光源の分光分布が与える自然物の好ましい色は観察対象物の色及び分光反射率に依存することを明らかにしている。特にバナナ以外の赤色系の赤リンゴ、桃、オレンジは光源の演色性の違いによって主観評価が大きく変化していたと述べている。

Weiらは⁷⁻¹²⁾、赤色・緑色を高彩度に演色するLEDランプ、及び赤色・緑色を低彩度に演色するLEDランプを実物大の2つの部屋にそれぞれ設置し、布、青果物、花などを含む観察対象物全体及び個々の色の“preference”(好ましさ)を経時比較させた。その結果、観察対象物全体、肌色(鏡に写った被験者自身の顔や手)、赤色、オレンジ色、緑色、木目は赤色・緑色を高彩度に演色するランプでより好ましいと評価され、中間色(灰色)、黄色、青色はランプによる評価差が生じないことを明らかにした。

Weiらは⁷⁻¹³⁾、隣接して置いた実験ブースに演色性の異なる2種類のLEDランプ($Ra97$ 、 $Ra85$)をそれぞれ設置し、高彩度7色の布(赤色、オレンジ色、黄色、緑色、青色、青紫色、ピンク色)、木目のボード、白いシャツ、低彩度8色のアイシャドー(化粧品)を含む観察

対象物全体及び個々の色の“preference”を両眼隔壁法で評価させた。その結果、赤色、ピンク色、オレンジ色など暖色系の色は高彩度に演色されると“preference”が増加するが、その他の色相の場合は増加しないことを明らかにした。

橋本ら^{7.7)}は演色性に対する赤色の重要性について述べ、JIS Z 8726-1975「光源の演色性評価方法」^{7.19)}の概説図2に基づき、 R_a と R_i の関係について考察している。これによれば「 R_a と R_i の相関は木の葉の緑色の演色性を表わす R_{14} を除いて高く、 R_a が高くなれば R_i も高くなる。しかし、特に R_a の変化に対し R_9 （赤色に対する特殊演色評価数の値）の変化が大きい。例えば、 R_a が50から100に変化した場合の特殊演色評価数 R_i の変化は、 R_9 で約200、 R_{10} 、 R_{13} で約50、 R_{11} 、 R_{12} 、 R_{15} で約70となる。つまり、 R_a の変化に対する R_9 の変化は、その他の特殊演色評価数の変化の約3倍である。このことは、高 R_a ランプは低 R_a ランプにくらべ、特に赤色の演色性改善への寄与が大きいことを示す。」とある。

上記の諸研究の結果及び考察を整理すると以下の2点が明らかである。

- ① 有彩色物体を個別に評価した場合、赤色やオレンジ色など赤色系の色相は演色性の影響を受けやすく、その他の色相は演色性の影響を僅かにしか受けない。
- ② 有彩色物体群（多色配色）を評価するとき、評価に最も影響を及ぼすのは赤色系の色相である。

すなわち、観察対象物に含まれる赤色が主観評価に影響を及ぼすことは明白であるが、黄みの赤色や紫みの赤色など赤色の色相範囲と主観評価の関係を調べた研究は見当たらない。また低照度下で絵のような多色配色を評価する場合においても赤色が重要であるか否かは明らかではなく、第6章で定義した「色質」に対する色相の影響も不明確である。

本節では「色質は観察対象物に含まれる色相によって変化する」と仮説を立て、色相を変化させた観察対象物を用いて、異なる照明下での「色質」と観察対象物の色相の関係を調べた。

7.2.2 実験

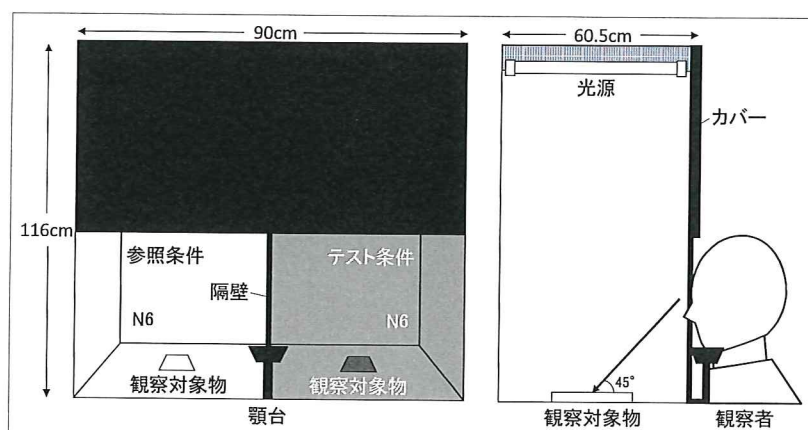
(a) 実験方法

実験は両眼隔壁法によって行い、左眼で観察する美術館用蛍光灯（パナソニック社製 FL20S・L-EDL・NU）700 lx 下での観察対象物の色彩印象を基準に、右眼で観察するテスト照明条件下の観察対象物の色彩印象を比較評価した。

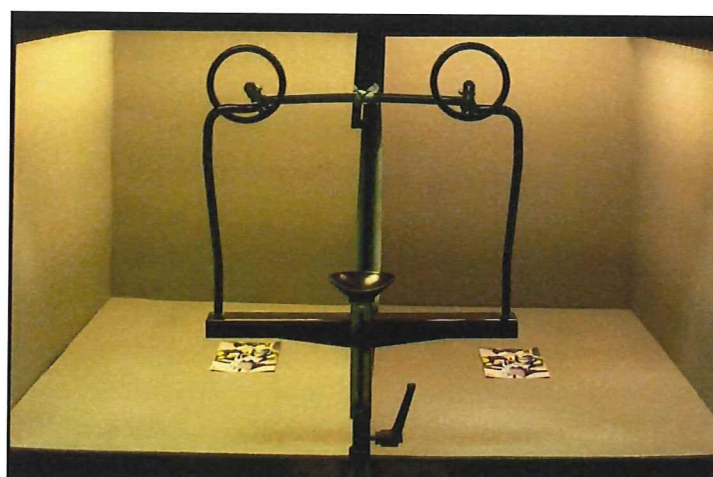
被験者は女性 17 名（18 歳～49 歳）である。4 名は色彩評価に習熟した学生であり、12 名は美術制作を学ぶ学生であり、1 名は美術制作や色彩評価の経験がない被験者である。眼鏡及びコンタクトレンズの使用制限は特に行わなかったが、日常的に視力矯正している被験者についてはその状態で実験に参加するよう教示した。

(b) 評価観察ブース

実験に用いた評価観察ブースを図 7-1 に示す。評価観察ブース（奥行き 60.0 cm、横 90.0 cm、高さ 116.0 cm）は暗室に設置した。ブースは中央を隔壁で仕切ることによって左右ブース上部に点灯するランプで左右異なる照明条件を設定した。ブースの内面は隔壁を含めて N6 無光沢紙で覆った。



(a) 評価観察ブース



(b) 評価観察ブース（観察対象物の配置例）

図 7-1 評価観察ブース。

(c) 評価形容詞対

図 7-2 に実験に使用した評価形容詞対 11 種類を示す。この 11 種類は第 6 章で用いたものと同じである。評価尺度は「どちらでもない」を中心に、「やや」、「かなり」、「非常に」を両側に配置した 7 段階尺度とした。

		非常に -3	かなり -2	やや -1	どちらでもない 0	やや +1	かなり +2	非常に +3	
No.1	地味な								派手な
No.2	濁った								澄んだ
No.3	静的な								動的な
No.4	暗い								明るい
No.5	汚い								美しい
No.6	不快な								快適な
No.7	重い								軽い
No.8	涼しい								暖かい
No.9	活気のない								活気のある
No.10	嫌いな								好きな
No.11	くすんだ								鮮やかな

図 7-2 実験に用いた評価形容詞対（11 種類）および 7 段階尺度

(d) 照明条件

実験に用いた光源の相対分光分布を図 7-3 に示し、特性値（相関色温度、 R_a 、 R_9 、色度 x_y 、偏差 Duv ）を表 7-1 に示し、照明条件を表 7-2 に示す。光色は照度規制の厳しい日本画展示照明を想定し、電球色に設定した。参照光源は美術館用高演色形蛍光ランプ（FL-EDL）1 種類である。テスト光源は LED ランプ 2 種類（RGB3 色 LED 混光タイプ：LED-RGB、青色 LED 励起黄色蛍光体タイプ：LED-BY）である。この 2 種類の LED ランプは対照的な演色性を有するランプであり、LED-RGB は FL-EDL よりも赤色を高彩度に演色し、LED-BY は FL-EDL よりも赤色を低彩度に演色するランプである。

照度は左右ブースの机上面照度で高照度-高照度条件（700 lx・700 lx）、高照度-低照度条件（700 lx・10 lx）とした。照度の調節は、光源の分光分布が変化しないように黒色木綿ランシャ生地を遮光フィルターとして使用し、重ねの枚数を増減することによって行った。参照光

源の照度は 700 lx 一定とした。照明条件を変化させた場合はその都度測定を行い、照度の誤差は±1%以内とした。

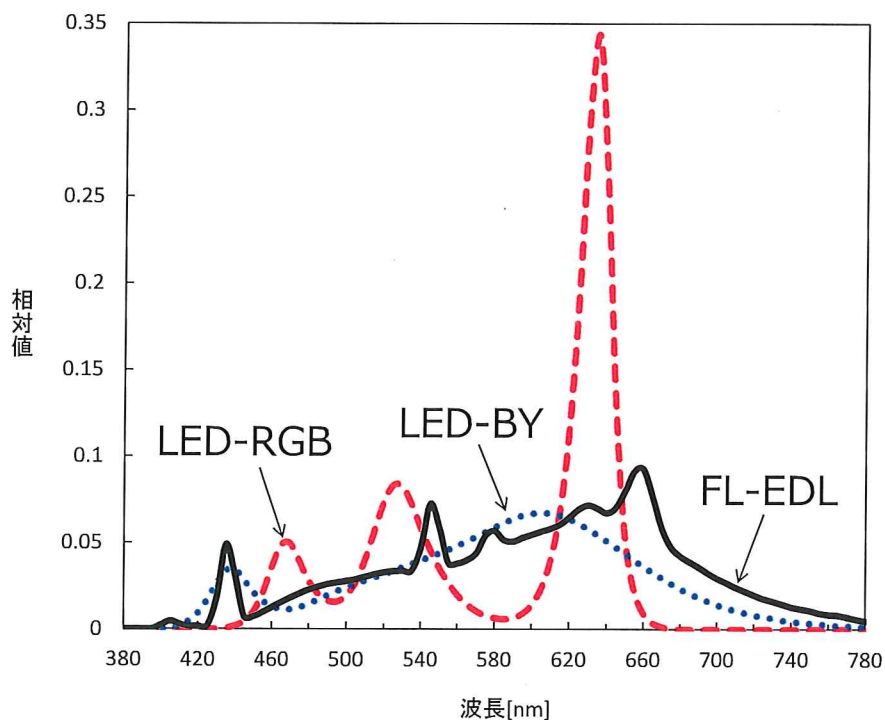


図 7-3 光源の分光分布（同一照度で正規化）

表 7-1 光源の特性（相関色温度、 R_a 、 R_g 、色度 xy 、 Duv ）

(CL-500Aによる測定値)								
光源	略称	CCT	R_a	R_g	x	y	Duv	
参照光源 高演色形蛍光ランプ	FL-EDL	3060	96	95	0.435	0.407	0.0018	
テスト光源 青色LED+黄色蛍光体タイプ	LED-BY	3060	84	19	0.430	0.397	-0.0017	
赤-緑-青3色タイプ	LED-RGB	3050	21	-172	0.457	0.389	-0.0066	

表 7-2 照明条件

条件	参照光源		テスト光源		実験条件名
1	700 lx	FL-EDL	700lx	LED-BY	BY700
2				LED-RGB	RGB700
3			10lx	LED-BY	BY10
4				LED-RGB	RGB10

(e) 観察対象物

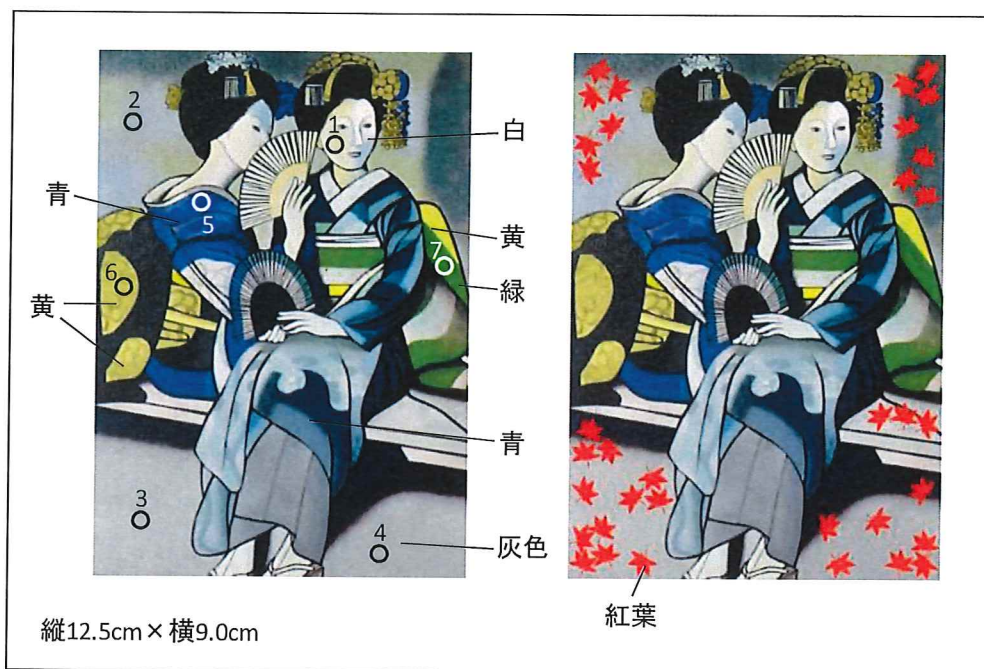
既往研究 7-9) ~7-13) から青色や黄色は光源の演色性の影響を僅かにしか受けないと仮定し、本節では青色系を基調とする橋本明治画伯の「月庭（山種美術館蔵）」を選定し「原図」とした。

本項では、「色質」に対する色相の影響を検討するため、「原図」に色相を系統的に変化させた紅葉画像を付加した画像を作成した。図 7-4 左は「原図」、右は紅葉画像を付加した画像である。

紅葉画像の色相選択の手順を以下に示す。

- (1) 白色厚紙（無光沢）に紅葉画像を付加した画像を印刷する（エプソン社 LP-S5000）。
- (2) 紅葉画像の分光反射率（コニカミノルタ社製分光測色計 CM-700d により 3 か所測定した平均値を採用）から FL-EDL700 lx 下の CIECAM02⁷⁻²⁰⁾ ブライトネス Q 、カラフルネスの赤色・緑色成分 a_M 、黄色・青色成分 b_M 、色相角 h を算出する。
- (3) CIECAM02 の Q - a_Mb_M 上で 8 色相（赤色、黄みの赤色、赤みの黄色、黄色、緑色、青色、青みの紫色、赤みの紫色）を選択する。8 色相の色相角 h は a_Mb_M 上の a_M 軸を 0° とし、反時計回り $20 \sim 355^\circ$ である。赤色が「色質」に最も影響する色相であると推測し、赤色系の色相を中心に選択した。

以上の手順で作成した観察対象物は「原図」及び紅葉画像を付加した画像 8 種類の計 9 種類である（ 12.5×9.0 cm）。観察対象物の分光反射率を図 7-5 に示し、色彩特性を表 7-3 に示し、 a_Mb_M カラフルネス座標を図 7-6 に示す。



No.	① 原図	② 緑色	③ 黄色	④ 橙色	⑤ 黄みの赤色	⑥ 赤色	⑦ 赤みの紫色	⑧ 青みの紫色	⑨ 青色
イメージ									

図 7-4 観察対象物

左：「原図」、右：「原図」に紅葉画像を付加した画像。「原図」内に示す数字は測定点である。

下：「原図」及び紅葉画像を付加した画像 8 種類

表 7-3 「原図」 および紅葉画像の色彩特性 (FL-EDL700 lx で計算)

(a) 「原図」

測定点	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
ブライトネスQ	172.32	172.01	177.38	171.03	125.84	173.68	130.05
カラフルネスM	3.70	4.44	3.83	5.01	18.63	18.56	8.03
赤緑成分 a_M	3.70	3.39	3.56	4.49	-1.17	0.05	-4.88
黄青成分 b_M	0.00	2.87	-1.40	-2.22	-18.60	18.56	6.37

(b) 紅葉画像

紅葉画像	緑色	黄色	黄みの赤色	橙色	赤色	赤みの紫色	青みの紫色	青色
ブライトネスQ	148.98	184.31	158.72	155.02	147.79	155.84	150.35	126.74
カラフルネスM	28.56	45.18	38.41	40.89	48.64	34.93	29.87	27.23
赤緑成分 a_M	-19.32	-4.14	29.94	36.08	45.74	34.80	29.07	-2.35
黄青成分 b_M	21.03	44.99	24.06	19.23	16.54	-2.97	-6.87	-27.13
色相角h	132.57	95.25	38.78	28.06	19.88	355.12	346.70	265.05

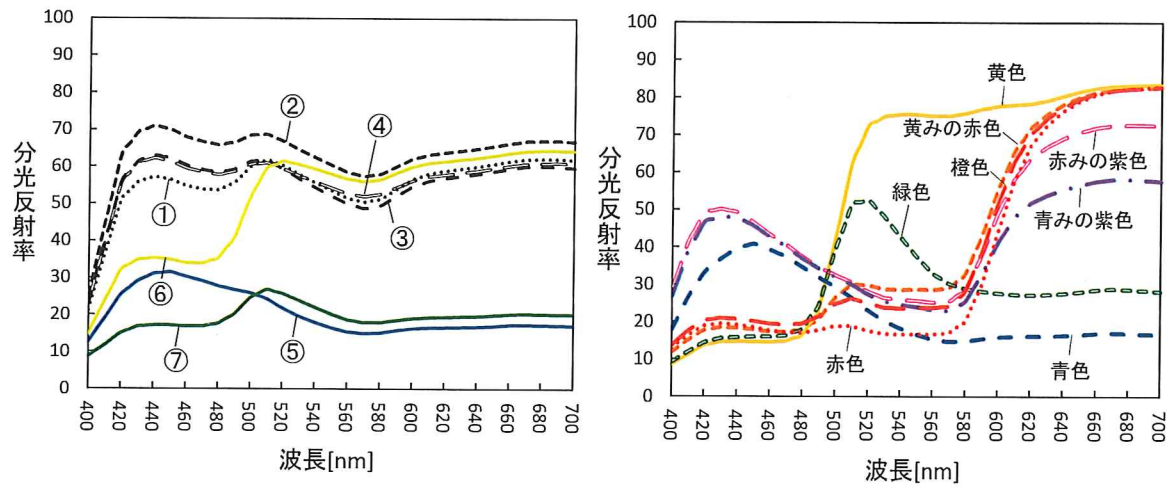


図 7-5 「原図」 および紅葉画像の分光反射率

左：「原図」、右：紅葉画像

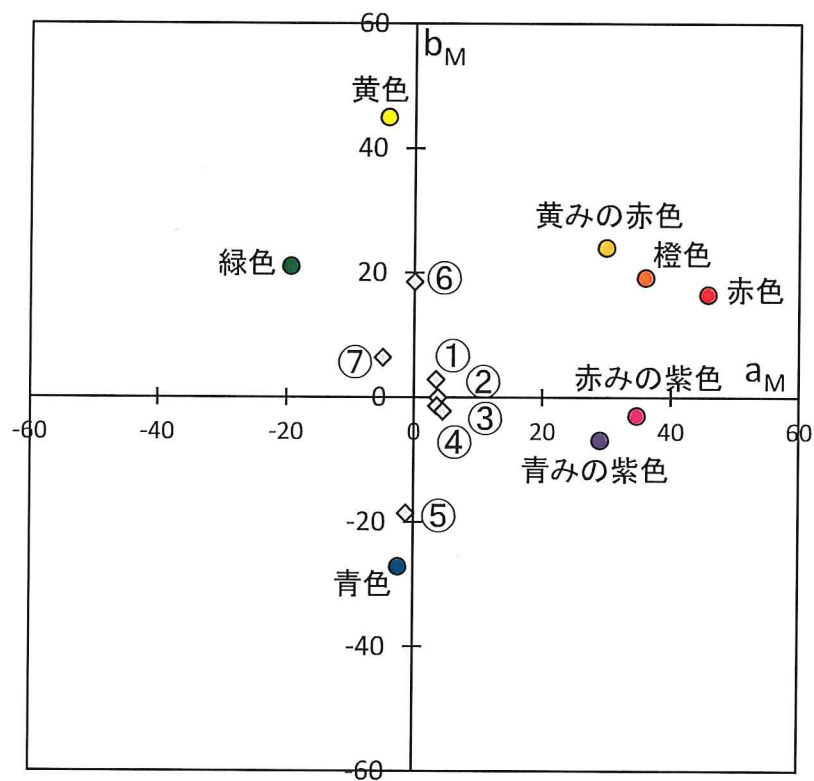


図 7-6 「原図」 および紅葉画像の $a_M b_M$ 値 (FL-EDL700 lx)

(f) 実験手順と教示

実験手順は以下の通りである。

- ① 被験者は暗室に入室後、実験に関する教示を受ける。教示を含め、約5分間の暗順応を行う。
- ② 被験者は実験ブースの中央に着座し、顎台で頭部を固定する。左右の照明条件に対してそれぞれの目を1分から3分間順応させる。
- ③ 実験者が左右のブースの中央に同一の観察対象物を配置する。
- ④ 被験者は左右のそれぞれの眼で観察対象物を斜め上45°の位置から観察し、実験者が読み上げた評価項目に対して口頭で回答する。回答はすべて実験者が用紙に記録する。
- ⑤ すべての観察対象物の評価が終了すると被験者は実験ブースから離れて待機し、実験者が照度ないしランプを変更した後、再び①からの手順を繰り返す。

①から⑤を1セッションとし、各被験者は4セッション(ランプ2種類×照度2種類=4)を、日を変えランダム順序で3回評価した。被験者には美術館照明を想定した印象評価実験であることを事前に示し、以下の教示に基づいて評価させた。

「左ブースのサンプルの印象と比較して、右ブースのサンプルの印象がどう見えるかを評価してください。評価の際はサンプルのどこを観察していただいても構いません。サンプルには絵を用いていますが、絵のデザインの良し悪しではなく、全体から受ける色の印象を答えるようにしてください。正しい答えがあるわけではありません。見たまま、感じたままに直感で答えてください」。

7.2.3 結果及び考察

(a) データ処理

主観評価値は7段階尺度の各尺度間が等間隔であるとみなし、評価尺度に対し+3から-3の数値を与えた。各被験者は1照明条件につき3回の繰り返し評価を行っているため、3回の繰り返し評価の平均値を各被験者の評価値とした。さらに被験者17人の評価値に対する平均値を被験者全平均値とした。

(b) 因子分析

本節で用いた色相を変化させた観察対象物を用いた場合でも第6章と同様の評価構造が確

認できるかを検証するために、被験者 17 人の評価値を用いて照度ごとに因子分析（主因子法、バリマックス回転）を行った。700 lx の結果（光源 2×観察対象物 9×被験者 17=306 データセット）及び 10 lx の結果（光源 2×観察対象物 9×被験者 17=306 データセット）に対する因子分析結果を表 7-4 に示す。両照度ともに“鮮やかさ”や“明るさ”などに関連する第1因子、“好ましさ”や“美しさ”に関連する第2因子、“暖かさ”に関連する第3因子が抽出された（第3因子までの累積寄与率 700 lx：77 %、10 lx：80 %）。グルーピングされた評価形容詞対は第6章で示した“色の質の因子”、“好ましさの因子”とほぼ同様の結果であることから、第1因子は“色の質の因子”、第2因子は“好ましさの因子”と解釈できる。

本項の因子分析結果からは第6章の因子分析結果で抽出されなかった“暖かさ”に関係する第3因子が抽出された。しかし“暖かいー涼しい”に対する因子負荷量をみると 700 lx の場合は-0.67、10 lx の場合は 0.60 であり、両照度ともに因子負荷量は大きくない。“暖かいー涼しい”は主に相関色温度（光色）との関係が強いため、同一光色条件下で行った本実験においては評価が困難であったとも考えられる。

すなわち本項で抽出した“色の質の因子”も第6章で定義した「色質」と同義であることが示された。

表 7-4 各照明下での因子分析結果

左：700 lx、右：10 lx

700 lx				10 lx			
評価形容詞対	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”	第3因子 “暖かさ”	評価形容詞対	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”	第3因子 “暖かさ”
派手なー地味な	-0.94	-0.16	-0.16	鮮やかなーくすんだ	-0.88	-0.28	0.14
鮮やかなーくすんだ	-0.93	-0.16	-0.16	澄んだー濁った	-0.88	-0.23	0.15
澄んだー濁った	-0.92	-0.24	-0.02	派手なー地味な	-0.87	-0.20	0.25
活気のあるー活気のない	-0.89	-0.16	-0.25	動的なー静的な	-0.82	-0.23	0.21
明るいー暗い	-0.87	-0.21	-0.20	明るいー暗い	-0.78	-0.28	0.27
動的なー静的な	-0.86	-0.03	-0.28	活気のあるー活気のない	-0.74	-0.26	0.33
軽いー重い	-0.62	-0.35	-0.23	軽いー重い	-0.61	-0.22	0.52
快適なー不快な	-0.12	-0.88	0.02	快適なー不快な	-0.25	-0.85	0.13
好きなー嫌いな	-0.10	-0.88	-0.11	好きなー嫌いな	-0.18	-0.76	0.10
美しいー汚い	-0.20	-0.86	-0.06	美しいー汚い	-0.24	-0.81	0.24
暖かいー涼しい	-0.41	-0.10	-0.67	暖かいー涼しい	-0.26	-0.22	0.60
寄与率	48.05	21.66	6.91	寄与率	41.84	20.25	8.88
累積寄与率	48.05	69.71	76.62	累積寄与率	41.84	62.10	70.97

(c) 色彩印象に対する観察対象物の色相の影響

各照明下における各評価形容詞対の主観評価値（被験者全平均）を表 7-5 に示し、標準偏差を表 7-6 に示す。本節では観察対象物に含まれる青色や黄色は光源の演色性の影響を僅かにしか受けないと仮説を立てたので、まずこの仮説に基づいて選定した「原図」について検証した。図 7-7 は各照明下における「原図」に対する主観評価プロフィールである。縦軸は本項 (b) 因子分析で抽出された 3 因子ごとに並べた評価形容詞対であり、横軸は被験者全平均値である。700 lx の場合、LED-BY、LED-RGB の主観評価プロフィールは“0”近傍でほぼ重なっている。これは参照光源 FL-EDL とテスト光源 LED-BY、LED-RGB がほぼ同等に評価されたことを意味し、光源の分光分布が変わっても「原図」の色彩印象が変化しなかったことを意味している。10 lx では全体的に色彩印象が低下しているが、LED-BY、LED-RGB の主観評価プロフィールはほぼ重なっている。

被験者全平均値に対する光源の影響を検討するため、照度ごとにテスト光源間の被験者全平均値に対する分散分析を行った。その結果、700 lx、10 lx とともに 1%水準で有意な差は認められなかった。すなわち、本研究で選定した「原図」は光源の演色性の影響をほとんど受けないことを確認した。

次に各照明下における色相別の主観評価プロフィールを図 7-8 に示す。縦軸と横軸の関係は図 7-7 の「原図」と同様である。主観評価プロフィールは付加した紅葉画像の色相によって異なり、その違いは特に“色の質の因子”において顕著である。一方、“好ましさの因子”や“暖かさの因子”の場合、700 lx では色相に関係なく評価が“0”近傍となり、10 lx では色相によらず“−1”近傍に集中していた。

被験者全平均値が“±3”など大きく振れている場合は評価に対する個人差が小さいと考えられるが、“0”近傍に集中している場合は評価に対する個人差が小さいか、もしくは個人差が大きかったかのどちらかであると考えられる。そこで、評価に対する個人差の影響について調べるために分散分析を行った。分散分析の結果、表 7-7 に示すように“色の質の因子”はどの照明条件においても多くの評価形容詞対に有意な差が認められなかった。一方“好ましさの因子”及び“暖かさの因子”に属する評価形容詞対は、すべての照明条件において 1 %水準で有意に異なっていた。

以上のことから“色の質の因子”は個人差が小さく定量的に扱える評価であり、“好ましさの因子”及び“暖かさの因子”は個人差が大きく定量化できない評価尺度であることが明らかになり、この結果は第 6 章の結果と同様であった。

表 7-5 各照明下の主観評価値（被験者全平均値）

因子名 評価形容詞対			“色”の質							“好ましさ”			“暖かさ”
			派手な/ 地味な	鮮やかな/ くすんだ	澄んだ/ 濁った	活気のある/ 活気のない	明るい/ 暗い	動的な/ 静的な	軽い/ 重い	快適な/ 不快な	好きな/ 嫌いな	美しい/ 汚い	暖かい/ 涼しい
照明 条件	BY700	緑色	0.10	0.10	0.47	0.20	0.39	-0.41	0.41	0.24	0.24	0.33	-0.29
		黄色	0.22	0.02	0.45	0.18	0.37	-0.20	0.53	0.18	0.27	0.29	-0.24
		黄みの赤色	-0.75	-0.80	-0.49	-0.61	-0.24	-0.71	-0.10	0.02	0.18	0.04	-0.53
		橙色	-0.86	-1.00	-0.63	-0.78	-0.39	-0.80	0.00	0.08	0.04	-0.18	-0.47
		赤色	-1.02	-1.14	-0.92	-0.78	-0.90	-0.84	-0.49	-0.25	-0.35	-0.43	-0.65
		赤みの紫色	-0.82	-1.00	-0.82	-0.82	-0.59	-0.80	-0.14	-0.27	-0.27	-0.27	-0.57
		青みの紫色	-0.29	-0.27	-0.06	-0.27	0.10	-0.35	0.20	0.27	0.35	0.25	-0.53
		青色	0.24	0.12	0.59	-0.04	0.29	-0.45	0.49	0.27	0.29	0.37	-0.57
		原図	0.18	0.16	0.31	-0.10	0.39	-0.25	0.41	0.27	0.16	0.33	-0.45
	RGB700	緑色	0.94	1.06	0.92	0.75	1.24	0.39	0.80	0.24	0.25	0.18	-0.10
		黄色	0.18	0.12	0.31	0.31	0.43	0.08	0.47	0.10	0.16	0.24	0.22
		黄みの赤色	1.47	1.49	1.35	1.35	1.57	1.14	0.82	0.20	0.27	0.41	0.65
		橙色	2.00	1.88	1.47	1.65	1.69	1.35	1.20	0.27	0.29	0.33	0.98
		赤色	2.37	2.43	1.92	1.94	2.02	2.12	1.20	0.10	0.20	0.29	0.39
		赤みの紫色	2.00	2.10	1.78	1.51	1.98	1.45	1.10	0.47	0.47	0.65	0.51
		青みの紫色	1.16	1.08	1.08	1.06	1.27	0.84	0.82	0.63	0.49	0.57	0.69
		青色	-0.02	0.00	0.18	0.18	0.35	-0.29	0.57	0.04	0.00	0.04	0.24
		原図	-0.08	0.00	0.20	0.20	0.51	-0.04	0.37	0.08	0.00	0.14	-0.06
	BY10	緑色	-2.29	-2.18	-2.22	-1.82	-2.47	-2.16	-1.76	-1.27	-0.94	-1.37	-1.20
		黄色	-2.25	-2.20	-2.25	-1.98	-2.29	-1.98	-1.92	-0.96	-0.80	-1.41	-1.16
		黄みの赤色	-2.33	-2.35	-2.22	-2.00	-2.53	-2.22	-1.80	-0.96	-0.80	-1.10	-0.84
		橙色	-2.65	-2.65	-2.59	-2.27	-2.61	-2.61	-1.96	-1.08	-0.82	-1.08	-0.94
		赤色	-2.88	-2.84	-2.80	-2.49	-2.76	-2.59	-2.27	-1.47	-1.31	-1.51	-1.33
		赤みの紫色	-2.49	-2.59	-2.43	-2.20	-2.67	-2.41	-2.04	-1.29	-1.06	-1.51	-0.98
		青みの紫色	-2.22	-2.39	-2.20	-2.18	-2.41	-2.18	-2.18	-1.22	-1.00	-1.43	-1.08
		青色	-2.24	-2.24	-2.24	-2.04	-2.49	-2.00	-2.08	-1.29	-0.88	-1.33	-1.37
		原図	-2.12	-2.12	-2.06	-2.02	-2.47	-1.86	-2.00	-1.04	-0.94	-1.22	-1.39
	RGB10	緑色	-1.63	-1.73	-1.45	-1.63	-1.90	-1.63	-1.49	-0.76	-0.73	-1.00	-0.76
		黄色	-2.10	-2.39	-2.16	-2.14	-2.33	-2.06	-1.86	-1.10	-0.92	-1.37	-0.75
		黄みの赤色	-0.94	-1.18	-1.02	-1.10	-1.37	-1.04	-0.82	-0.63	-0.35	-0.65	-0.27
		橙色	-1.02	-0.90	-0.92	-1.00	-1.39	-0.96	-0.90	-0.55	-0.47	-0.73	-0.20
		赤色	-0.82	-0.75	-0.80	-0.75	-1.29	-0.75	-1.02	-0.25	-0.31	-0.43	-0.29
		赤みの紫色	-1.00	-0.96	-1.02	-0.90	-1.25	-1.02	-0.92	-0.71	-0.47	-0.86	0.02
		青みの紫色	-1.47	-1.41	-1.27	-1.33	-1.71	-1.31	-1.22	-0.88	-0.57	-1.00	-0.41
		青色	-2.12	-2.18	-1.86	-1.98	-2.39	-1.98	-1.59	-1.00	-0.82	-1.08	-0.78
		原図	-2.04	-2.12	-1.98	-1.61	-2.12	-1.88	-1.75	-0.90	-0.73	-1.04	-1.00

表 7-6 各照明下の主観評価値に対する標準偏差

因子名 評価形容詞対			“色”の質							“好ましさ”			“暖かさ”
			派手な/ 地味な	鮮やかな/ くすんだ	澄んだ/ 濁った	活気のある/ 活気のない	明るい/ 暗い	動的な/ 静的な	軽い/ 重い	快適な/ 不快な	好きな/ 嫌いな	美しい/ 汚い	暖かい/ 涼しい
照明 条件	BY700	緑色	0.57	0.69	0.54	0.46	0.65	0.40	0.42	0.45	0.59	0.61	0.76
		黄色	0.49	0.55	0.33	0.39	0.41	0.51	0.44	0.36	0.47	0.39	0.48
		黄みの赤色	0.25	0.24	0.53	0.38	0.48	0.35	0.54	0.55	0.44	0.54	0.46
		橙色	0.21	0.12	0.48	0.31	0.57	0.24	0.60	0.53	0.60	0.70	0.44
		赤色	0.25	0.35	0.34	0.42	0.20	0.34	0.50	0.46	0.64	0.45	0.36
		赤みの紫色	0.27	0.12	0.24	0.34	0.45	0.33	0.57	0.41	0.54	0.68	0.47
		青みの紫色	0.55	0.58	0.69	0.57	0.56	0.46	0.62	0.46	0.46	0.57	0.41
		青色	0.40	0.55	0.34	0.55	0.47	0.39	0.47	0.52	0.58	0.50	0.52
		原図	0.54	0.59	0.57	0.61	0.49	0.60	0.49	0.38	0.59	0.57	0.47
	RGB700	緑色	0.47	0.41	0.30	0.32	0.37	0.56	0.37	0.81	0.92	0.95	0.75
		黄色	0.58	0.59	0.42	0.52	0.39	0.61	0.44	0.52	0.52	0.51	0.74
		黄みの赤色	0.62	0.47	0.38	0.51	0.54	0.50	0.78	0.96	0.80	0.97	0.76
		橙色	0.67	0.66	0.46	0.57	0.64	0.63	0.66	0.96	1.09	1.07	1.81
		赤色	0.37	0.47	0.48	0.57	0.56	0.31	0.74	1.34	1.29	1.30	1.06
		赤みの紫色	0.60	0.61	0.60	0.55	0.75	0.47	0.83	0.89	1.12	0.89	0.64
		青みの紫色	0.60	0.56	0.56	0.38	0.47	0.46	0.46	0.58	0.77	0.75	0.43
		青色	0.49	0.59	0.64	0.49	0.58	0.50	0.37	0.48	0.61	0.58	0.61
		原図	0.57	0.54	0.44	0.47	0.44	0.47	0.65	0.48	0.75	0.67	0.62
	BY10	緑色	0.33	0.24	0.31	0.58	0.33	0.37	0.70	0.65	0.84	0.61	0.93
		黄色	0.45	0.33	0.30	0.59	0.35	0.55	0.48	0.99	0.73	0.64	0.88
		黄みの赤色	0.37	0.34	0.26	0.59	0.43	0.50	0.65	0.81	0.92	0.83	0.96
		橙色	0.40	0.40	0.40	0.53	0.40	0.50	0.56	0.72	0.87	0.77	0.97
		赤色	0.29	0.24	0.24	0.41	0.33	0.38	0.44	0.62	0.75	0.55	1.01
		赤みの紫色	0.34	0.36	0.26	0.47	0.41	0.40	0.58	0.67	0.71	0.64	0.96
		青みの紫色	0.31	0.38	0.29	0.46	0.34	0.36	0.58	0.61	0.88	0.96	0.83
		青色	0.33	0.28	0.28	0.51	0.43	0.49	0.48	0.84	1.02	0.84	1.16
		原図	0.41	0.42	0.40	0.45	0.39	0.51	0.39	0.74	0.72	0.60	0.75
	RGB10	緑色	0.44	0.38	0.51	0.45	0.31	0.50	0.61	0.60	0.91	0.71	0.65
		黄色	0.39	0.43	0.41	0.29	0.46	0.47	0.66	0.69	1.07	0.58	1.00
		黄みの赤色	0.40	0.36	0.48	0.26	0.48	0.16	0.58	0.48	0.64	0.58	0.76
		橙色	0.34	0.31	0.30	0.53	0.46	0.33	0.47	0.37	0.58	0.57	0.78
		赤色	0.34	0.42	0.24	0.52	0.39	0.36	0.52	0.48	0.53	0.39	0.80
		赤みの紫色	0.29	0.23	0.38	0.39	0.43	0.36	0.30	0.59	0.66	0.47	0.59
		青みの紫色	0.44	0.40	0.36	0.46	0.47	0.43	0.46	0.64	0.74	0.59	0.80
		青色	0.33	0.27	0.47	0.14	0.41	0.36	0.52	0.69	0.66	0.55	1.01
		原図	0.37	0.26	0.38	0.34	0.20	0.31	0.40	0.59	0.88	0.53	0.96

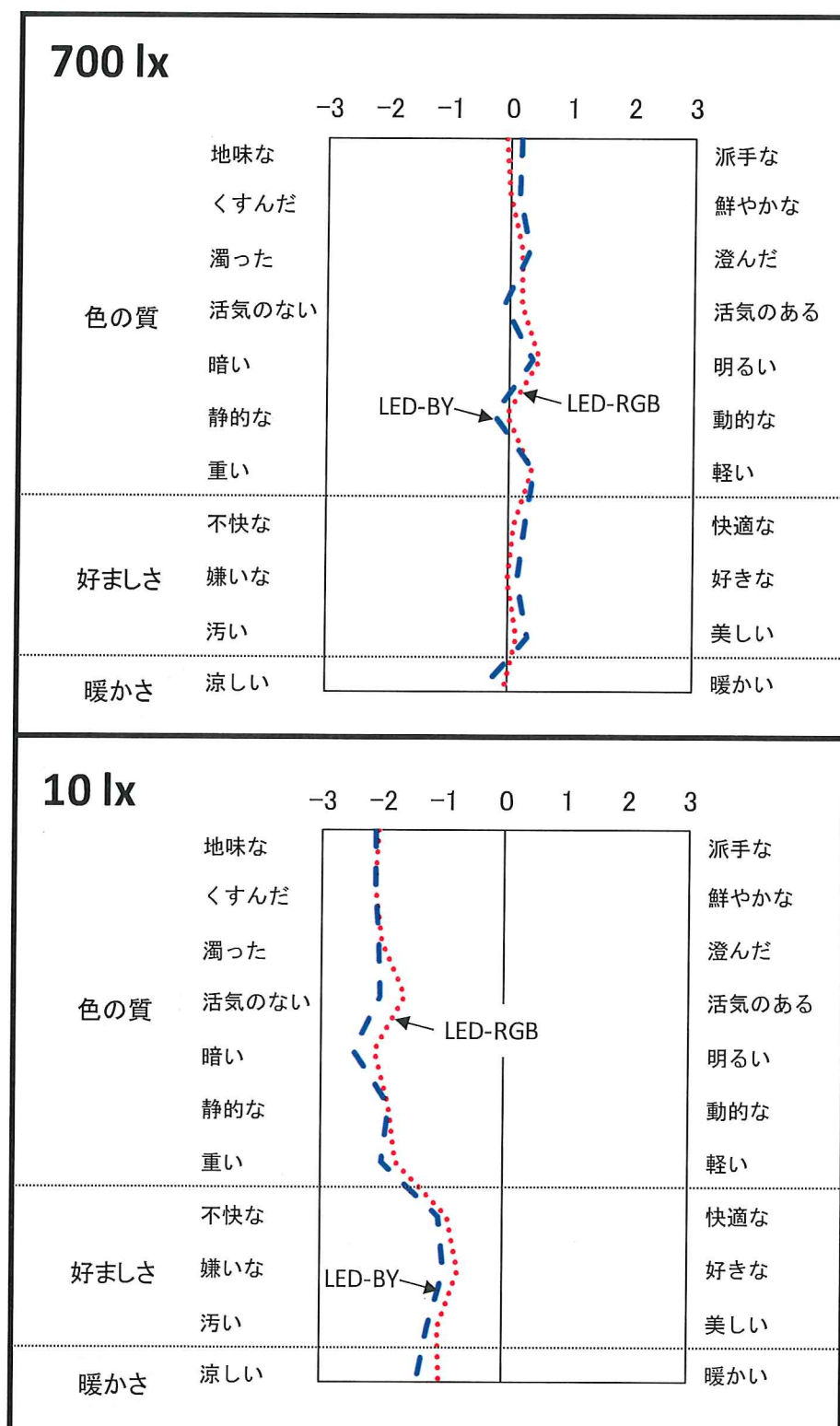


図 7-7 「原図」の主観評価プロフィール

上段：700 lx、下段：10 lx

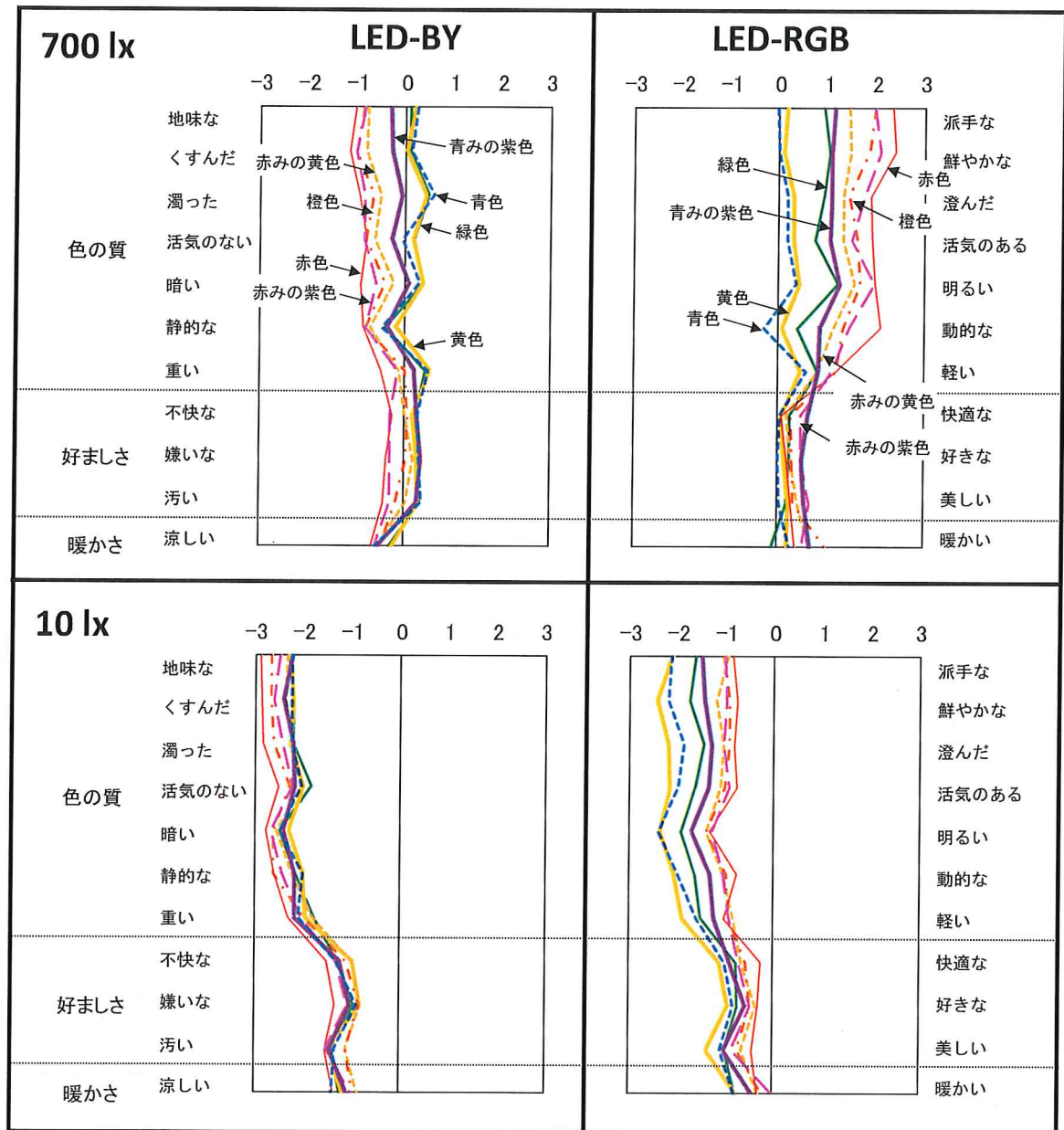


図 7-8 紅葉画像の色相別の主観評価プロフィール

上段：700 lx、下段：10 lx

左：LED-BY、右：LED-RGB

表 7-7 主観評価値に対する被験者間の有意差検定結果

因子名	評価形容詞対	700 lx		10 lx	
		LED-RGB	LED-BY	LED-RGB	LED-BY
“色の質”	派手な－地味な	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	鮮やかな－くすんだ	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	澄んだ－濁った	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	活気のある－活気のない	n.s.	n.s.	n.s.	**
	明るい－暗い	**	n.s.	**	*
	動的な－静的な	n.s.	*	n.s.	**
	軽い－重い	**	**	**	**
“好ましさ”	快適な－不快な	**	**	**	**
	好きな－嫌いな	**	**	**	**
	美しい－汚い	**	**	**	**
“暖かさ”	暖かい－涼しい	**	**	**	**

n.s.(no significant difference): 有意差なし, *:5%水準で有意, **:1%水準で有意

(d) 色の質の因子、好ましさの因子、暖かさの因子に対する観察対象物の色相の影響

主観評価値に対する色相の影響をより詳細に解析するために、“色の質の因子”、“好ましさの因子”、“暖かさの因子”に対する色相の影響を検討した。各因子を表す評価形容詞対は“色の質の因子”は「派手な－地味な」、「好ましさの因子」は「快適な－不快な」、「暖かさの因子」は「暖かい－涼しい」とした。

図 7-9 は各因子を代表する評価形容詞対に対する主観評価値と紅葉画像の色相角 h (CIECAM02、FL-EDL700 lx) の関係である。図 7-9 から明らかなように主観評価値に対する色相の影響は因子によって異なっている。

“色の質の因子”は光源、照度の違いによらず特定の色相角をピークとした曲線を持ち、700 lx、10 lx とともに LED-RGB は凸型曲線、LED-BY は凹型曲線と対照的な曲線を描いている。LED-RGB、LED-BY とともに色相角 h が約 20° (赤色)、約 230° (緑色) に曲線のピークがあり、約 90° (黄色)、約 260° (青色) 付近に最小値がある。この傾向は“色の質の因子”のその他の評価形容詞対でも同様であった。すなわち“色の質の因子”の評価において演色性の影響を最も受ける色相は赤色であることが明らかとなった。

10 lx の場合は、照度が低下することによって主観評価値が低下するため、LED-RGB、

LED-BY とも曲線がマイナスの方向にずれているが、その相対関係はほぼ変化していない。これは観察対象物に赤色系の色が含まれている場合、低照度下でも演色性の差を認識していることを意味している。

“好ましさの因子”、“暖かさの因子”は“色の質の因子”の傾向とは異なり、どの照明条件でも僅かな凹凸を有する曲線を示している。また“色の質の因子”に比べ、照度の影響が僅かである。このことから“好ましさの因子”、“暖かさの因子”は、光源、照度、観察対象物の色相の影響をほとんど受けないといえる。これらの傾向は各因子のその他の評価形容詞対でも同様であった。

以上から、“色の質の因子”すなわち「色質」は観察対象物に含まれる色相によって異なり、最も影響が大きいのは赤色であることが明らかになった。

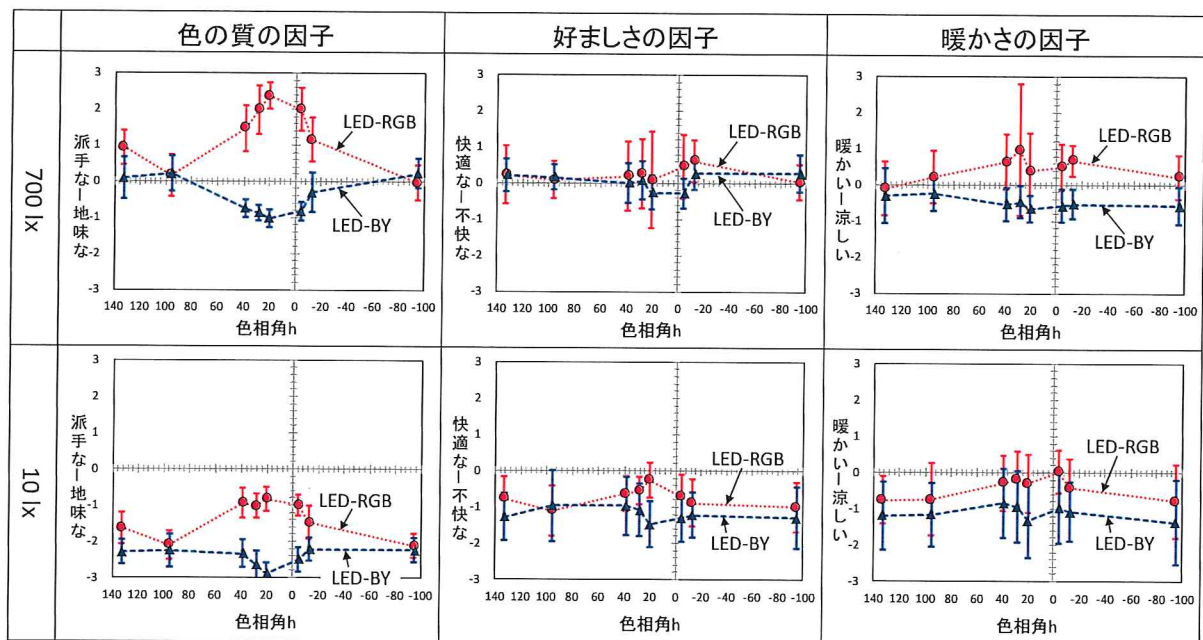


図 7-9 各因子を代表する評価形容詞対の主観評価値と観察対象物の色相角 h の関係

上段：700 lx、下段：10 lx

縦軸：主観評価値、横軸：色相角 (CIECAM02 h、FL-EDL700 lx)

(e) 色の質の因子とカラフルネス M との関係

演色性の影響を受けない青色系の「原図」に、赤色や緑色の紅葉画像を付加することによって“色の質の因子”すなわち「色質」が変化することが明らかになった。すなわち被験者は「色質」を評価するとき、特定の色相の色の見えに注目し、評価の物差しにしていたと考えられる。このことから「色質」は、図 7-10 に示すような観察対象物に含まれる注目色に対するカラフルネス M の差分 ΔM に基づいて評価されていると仮定し、紅葉画像の色相角 h と ΔM の関係について検討した。

ΔM は参照光源 FL-EDL700 lx とテスト光源 E lx 下でのカラフルネス差であり、(7-1) 式によって算出する。なお、このときの ΔM は全照明条件における ΔM_{MAX} 値で除した相対値とした。M 値は CIECAM02 によって求められる色の鮮やかさに相当する値である。 $M_{R(E)}$ は参照光源 (FL-EDL700 lx) 下の M 値であり、 $M_{T(E)}$ はテスト光源 (テスト光源 E lx) 下の M 値である。

さらに、カラフルネス以外の測色値との対応についても確認するため、ブライトネス Q の差分である ΔQ についても (7-2) 式によって算出し、同様に検討した。

$$\Delta M = \frac{(M_{R(E)} - M_{T(E)})}{\Delta M_{MAX}} \quad \text{-----} \quad (7-1)$$

$$\Delta Q = \frac{(Q_{R(E)} - Q_{T(E)})}{\Delta Q_{MAX}} \quad \text{-----} \quad (7-2)$$

紅葉画像の色相角 h と ΔM の関係、及び紅葉画像の色相角 h と「色質」の関係を図 7-11 に示す。両者を比較すると、LED-RGB、LED-BY の相対関係が良好に一致していることがわかる。図 7-12 は「色質」を表す評価形容詞対のひとつである「派手な—地味な」の主観評価値と ΔM の関係であり、両者に良好な対応関係があることが明らかである (相関係数 0.94、1%水準で相関あり)。この対応関係は「色質」を表すその他の評価形容詞対についても同様であった。

図 7-13 は「色質」を表す評価形容詞対のひとつである「派手な—地味な」の主観評価値と ΔQ の関係であるが、両者には負の相関があるものの ΔM に比べると明らかに対応していないことがわかる (相関係数 -0.84)。

以上のことから、「色質」は観察対象物に含まれる注目色に対する参照光源とテスト光源間のカラフルネス M の差分 (ΔM) に基づいて評価されており、測色計算値である ΔM によって推定できることが明らかになった。

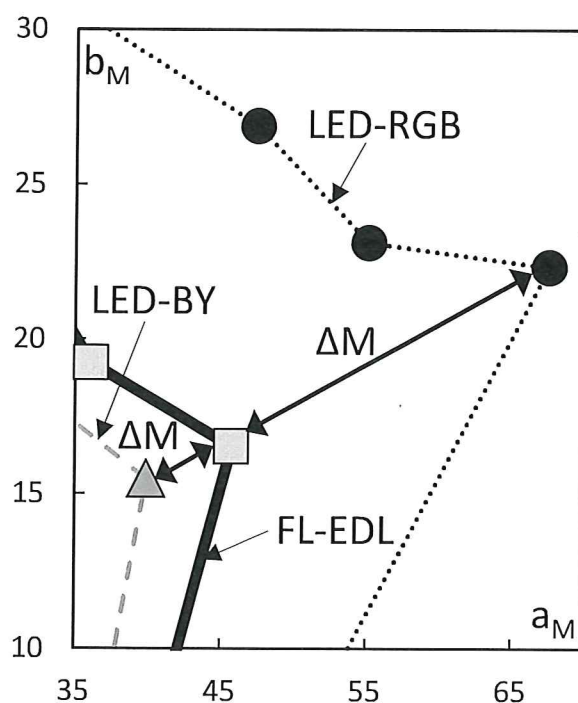


図 7-10 ΔM の模式図

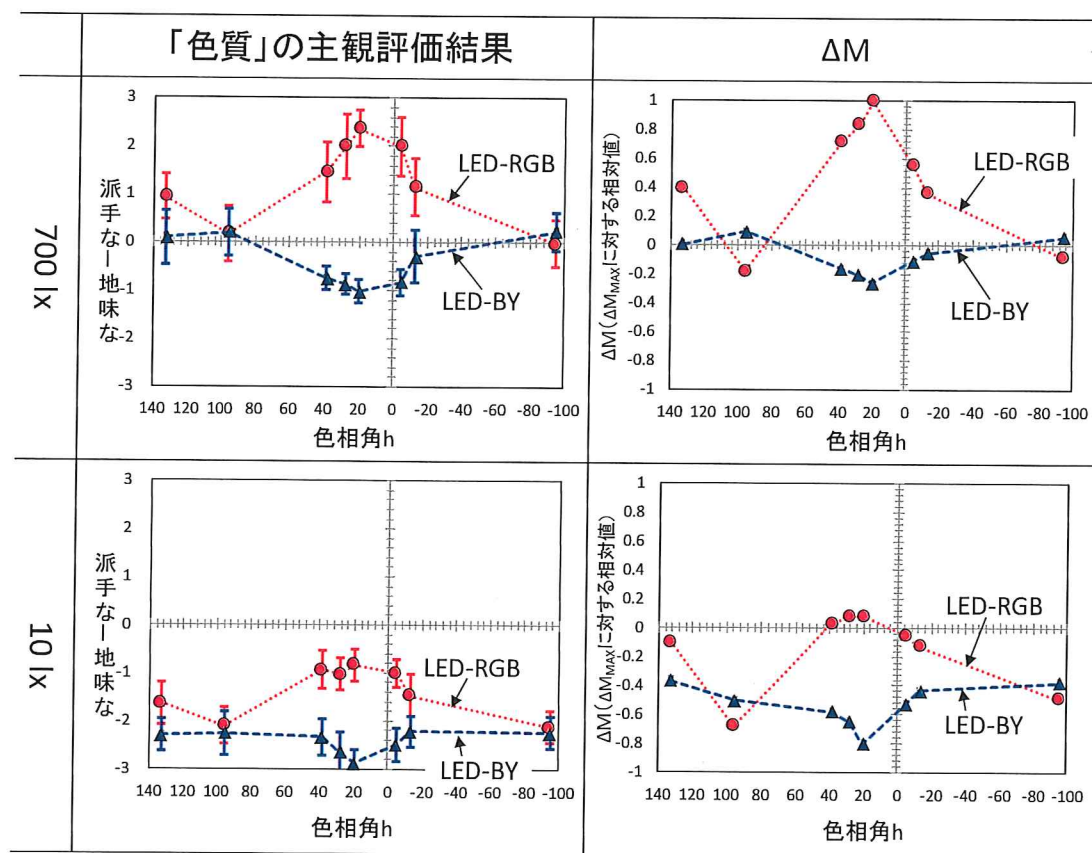


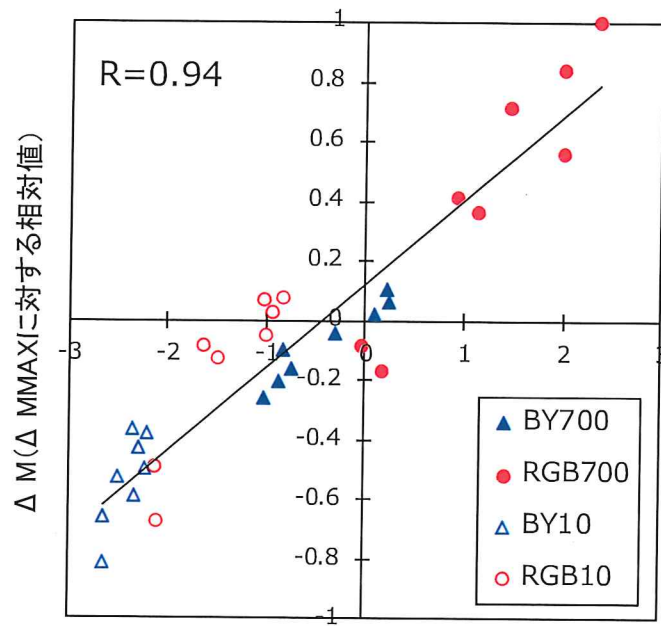
図 7-11 「色質」の主観評価値と色相角 h の関係、

及び紅葉画像の色相角 h と ΔM の関係

上段 : 700 lx、下段 : 10 lx

縦軸 (左) : 主観評価値、横軸 (左) : 色相角 (CIECAM02 h 、FL-EDL700 lx)

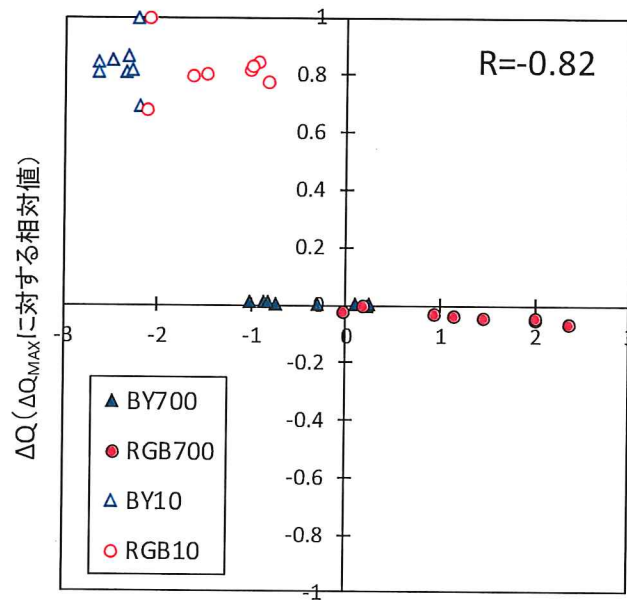
縦軸 (右) : ΔM 、横軸 (左) : 色相角 (CIECAM02 h 、FL-EDL700 lx)



「色質」の主観評価値(派手な—地味な)

図 7-12 「色質」の主観評価値と ΔM の関係

縦軸： ΔM 、横軸：主観評価値



主観評価値(派手な—地味な)

図 7-13 「色質」の主観評価値と ΔQ の関係

縦軸： ΔQ 、横軸：主観評価値

7.2.4 結論

本節では色相を変化させた観察対象物を用いて、異なる照明下での「色質」を含む色彩印象と色相の関係を調べた。以下のことが明らかになった。

- (1) 被験者は「色質」を評価するとき、特定の色相の色の見えに注目し、評価の物差しにしていた。
- (2) 「色質」は観察対象物に含まれる色相によって異なり、最も影響が大きいのは赤色である。黄色や青色は影響がない。
- (3) 「色質」は、観察対象物に含まれる注目色に対する参照光源とテスト光源間のカラフルネス M の差分 (ΔM) によって推定できる。

7.3 実験2（観察対象物の赤色の有無の影響）

7.3.1 はじめに

前節の結果から、被験者は“色の質の因子”を代表する「色質」を評価するとき、特定の色相の色の見えに注目し、評価の物差しにしていたことがわかった。また「色質」は観察対象物に含まれる色相によって異なり、評価に対して最も影響が大きいのは赤色であり、黄色や青色は評価に影響しないことを明らかにした。第5章の2色配色においても同様の結果が得られたことから、「色質」の評価は観察対象物に赤色を含むか否かによって大きく異なり、それは配色数によらないことが予測できる。

以上のことから、本節では演色性と赤色の色再現に対する照度の影響に着目し、さらに観察対象物に含まれる赤色の有無が低照度下での「色質」にどのように影響するのかを検討した。

7.3.2 実験

(a) 実験方法

実験は第7.2節と同様に両眼隔壁法によって行い、左眼で観察する美術館用蛍光ランプ（パナソニック社製 FL20S・L-EDL・NU）700 lx 下での観察対象物の色彩印象を基準に、右眼で観察するテスト照明条件下の観察対象物の色彩印象を比較評価した。

被験者は美術大学の学生10名（女性）である。4名は色彩評価に習熟した学生であり、6名は美術制作を学ぶ学生である。眼鏡及びコンタクトレンズの使用制限は特に行わなかったが、日常的に視力矯正している被験者についてはその状態で実験に参加するよう教示した。

(b) 評価観察ブース

第7.2節と同様の評価観察ブースを用いた。

(c) 評価形容詞対

第7.2節と同様の評価形容詞対11種類、7段階尺度を用いた。

(d) 照明条件

実験に用いた光源の相対分光分布を図7-14に、特性値（相関色温度、 R_a 、 R_9 、色度 xy 、偏差 Duv ）を表7-8に、各照明条件を表7-9に示す。光色は日本画展示照明を想定し、電球色に設定した。参照光源は美術館用の高演色形蛍光ランプ（以下、FL-EDL）1種類である。

テスト光源は演色性が対照的なLEDランプ2種類(RGB3色LED混光タイプ: LED-RGB、青色LED励起黄色蛍光体タイプ: LED-BY)、美術館・博物館用の高演色形蛍光ランプ1種類 (FL-EDL)、一般形蛍光ランプ1種類 (FL-WW) の4種類である。

照度は左右ブースの机上面照度で高照度・高照度条件 (700 lx・700 lx)、高照度・低照度条件 (700 lx・10 lx) とした。照度の調節は光源の分光分布が変化しないように黒色木綿ラシャ生地を遮光フィルターとして使用し、重ねの枚数を増減することによって行った。参照光源の照度は700 lx一定とした。照明条件を変化させた場合はその都度測定を行い、照度の誤差は±1%以内とした。

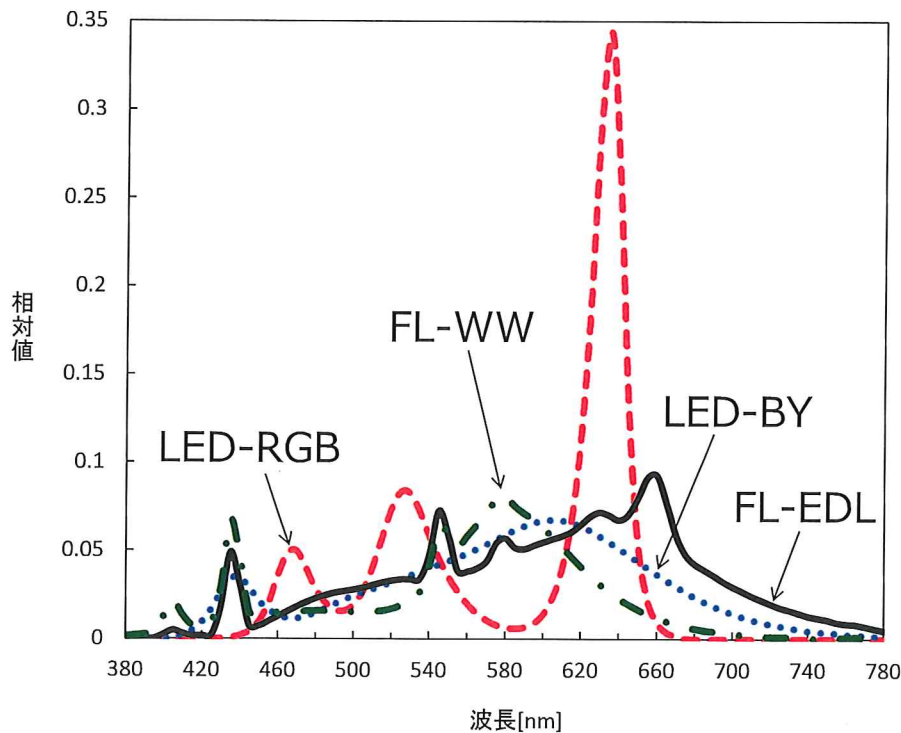


図 7-14 用いた光源の分光分布 (同一照度で正規化)

表 7-9 用いた光源の特性値 (相関色温度、 R_a 、 R_g 、色度 x_y 、偏差 D_{uv})

		(GL-500Aによる測定値)						
	光源	略称	CCT	R_a	R_g	x	y	Duv
参照光源	高演色形蛍光ランプ	FL-EDL	3060	96	95	0.435	0.407	0.0018
	高演色形蛍光ランプ	FL-EDL	3060	96	95	0.435	0.407	0.0018
テスト光源	青色LED+黄色蛍光体タイプ	LED-BY	3060	84	19	0.430	0.397	-0.0017
	一般形蛍光ランプ	FL-WW	3460	55	-110	0.411	0.401	0.0030
	赤-緑-青3色タイプ	LED-RGB	3050	21	-172	0.457	0.389	-0.0066

表 7-9 照明条件

条件	参照条件		テスト条件		実験条件名
1	700 lx	FL-EDL	700 lx	FL-EDL	EDL700
2				LED-BY	BY700
3				FL-WW	WW700
4				LED-RGB	RGB700
5			10 lx	FL-EDL	EDL10
6				LED-BY	BY10
7				FL-WW	WW10
8				LED-RGB	RGB10

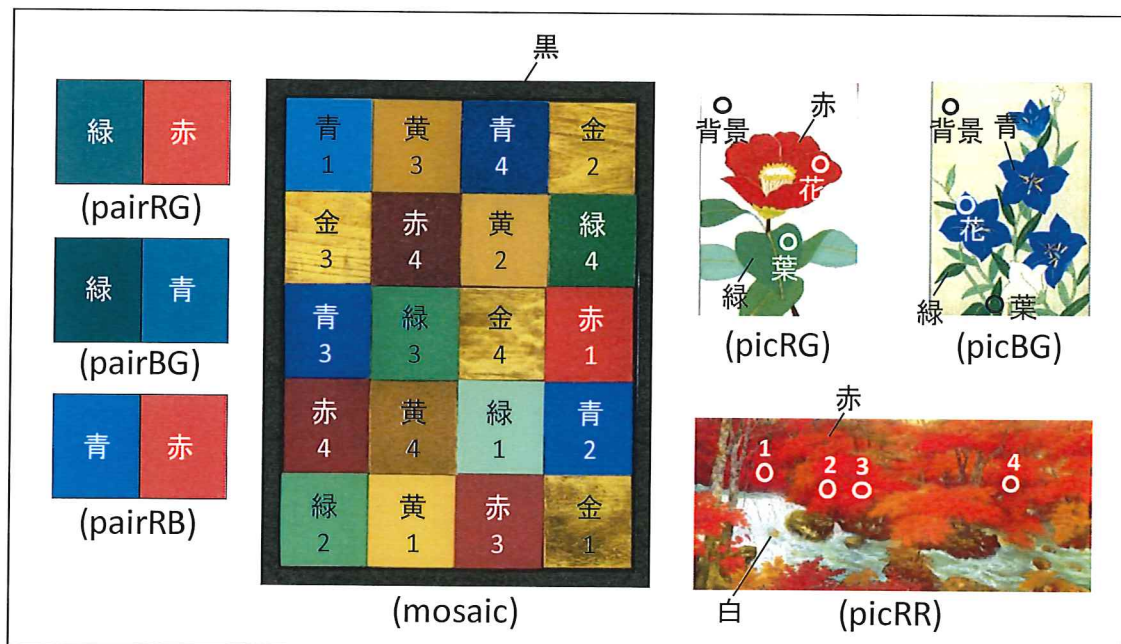


図 7-15 観察対象物

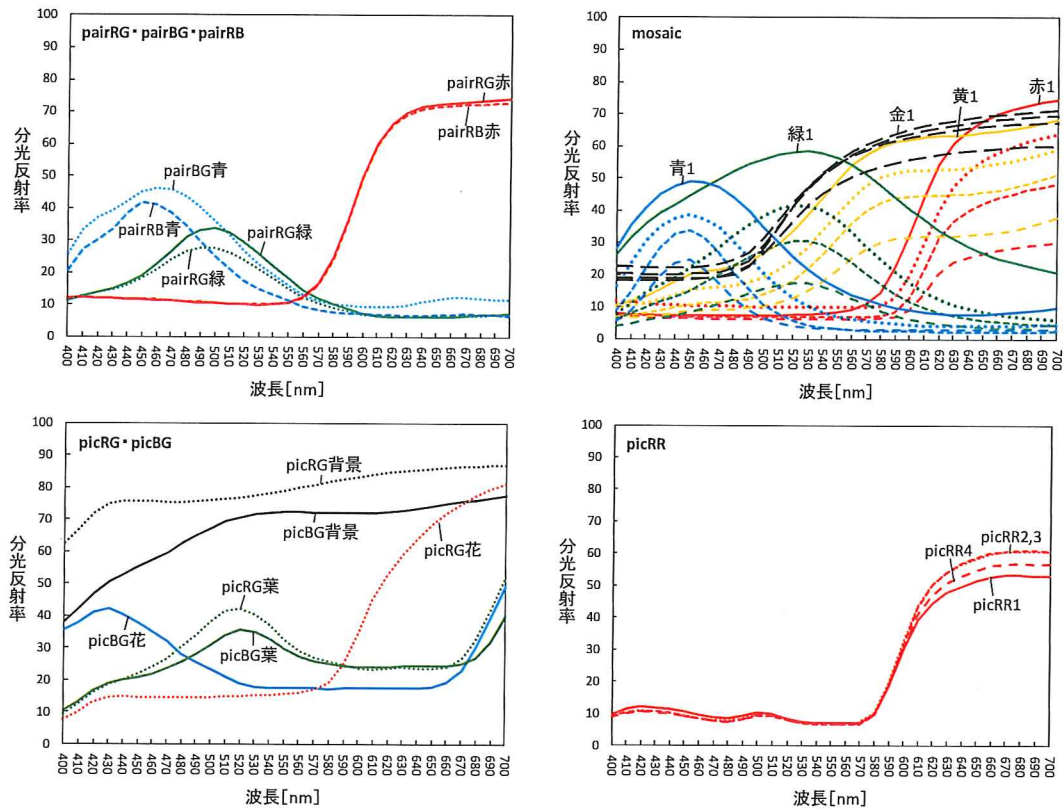


図 7-16 観察対象物の分光反射率

表 7-10 観察対象物の色彩特性 (CIECAM02)

(参照光源FL-EDL 700 lxで計算)

サンプル		Q	a _M	b _M	サンプル	Q	a _M	b _M	
pairRG	緑	114.4	-29.3	-13.3	青1	121.2	-20.3	-39.1	
	赤	145.1	52.8	25.4	青2	101.4	-14.5	-44.2	
pairBG	緑	119.0	-34.6	-11.5	青3	85.9	-8.1	-47.4	
	青	121.8	-18.3	-36.2	青4	83.4	-0.9	-39.2	
pairRB	赤	144.7	52.7	25.0	金1	172.7	6.9	33.1	
	青	111.2	-14.3	-39.2	金2	172.0	6.9	30.9	
mosaic (20色)	赤1	134.4	54.4	26.4	金3	166.1	6.3	29.0	
	赤2	127.0	42.9	14.3	金4	171.7	6.2	28.4	
	赤3	116.2	41.8	14.6	picRG	1(花)	141.3	40.4	17.4
	赤4	107.0	30.4	9.8		2(葉)	144.1	-17.2	9.3
	黄1	168.9	9.6	30.5		3(背景)	190.5	4.6	6.2
	黄2	159.7	11.6	30.2	picBG	1(花)	127.8	4.8	-23.6
	黄3	151.5	12.7	31.6		2(葉)	141.5	-10.6	9.7
	黄4	84.9	13.0	26.4		3(背景)	184.0	0.4	11.9
	緑1	164.4	-21.8	4.9	picRR	1	127.9	50.3	15.0
	緑2	140.6	-35.8	6.4		2	130.7	54.1	19.0
	緑3	128.0	-34.6	6.3		3	129.8	55.7	18.8
	緑4	108.6	-29.7	5.1		4	128.6	52.7	18.3

(e) 観察対象物

図 7-15 は実験に使用した観察対象物であり、赤色を含む 5 種類、赤色を含まない 2 種類の計 7 種類である。「2 色配色」は、赤色-緑色 (pairRG)、青色-緑色 (pairBG)、赤色-青色 (pairRB) の 3 種類である (8.0 × 6.0 cm)。「多色配色 (mosaic)」は、4 種類の粒子径 (白番、11 番、9 番、5 番) の辰砂 (赤色)、黄土 (黄色)、緑青 (緑色)、群青 (青色) の天然岩絵具 16 色及び金箔 4 色 (純金、五毛色、1 号色、2 号色) の計 20 色の色票からなり、それぞれ檜板及び和紙 (5.0×5.0 cm) に塗布ないし貼り付け、黒いボード紙にランダム配置した (30.0×21.0 cm)。「絵 (岩絵具)」は、赤色-緑色を基調とした絵 (picRG) と、青色-緑色を基調とした絵 (picBG) の 2 種類であり、新岩絵具^{注 7-1)} 及びパール絵具^{注 7-2)} で描画した (10.0×14.8 cm)。「絵 (赤色)」 (picRR) は、奥田元宗の「奥入瀬 (秋)」をエプソン社 LP-S5000 で白色厚紙 (無光沢) に印刷した。

各観察対象物は分光反射率 (CM-700d により 3 か所測定した平均値を採用、図 7-16) から FL-EDL700 lx 下での CIECAM02 ブライトネス Q 、カラフルネスの赤色-緑色成分 a_M 、黄色-青色成分 b_M を計算した。表 7-10 に各観察対象物の Q 値、 a_M 値、 b_M 値を示す。

(f) 実験手順及び教示

実験手順は以下の通りである。

- ① 被験者は暗室に入室後、実験に関する教示を受ける。教示を含め、約 5 分間の暗順応を行う。
- ② 被験者は実験ブースの中央に着座し、顎台で頭部を固定する。左右の照明条件に対してそれぞれの目を 1 分から 3 分間順応させる。
- ③ 実験者が左右のブースの中央に同一の観察対象物を配置する。
- ④ 被験者は左右のそれぞれの眼で観察対象物を斜め上 45° の位置から観察し、実験者が読み上げた評価項目に対して口頭で回答する。回答はすべて実験者が用紙に記録する。
- ⑤ すべての観察対象物の評価が終了すると被験者は実験ブースから離れて待機し、実験者が照度ないしランプを変更した後、再び①からの手順を繰り返す。

注 7-1) 新岩絵具：染料で特殊着色したガラスを砕き精製した日本画用絵具

注 7-2) パール絵具：パールのような煌めき、光沢を有した絵具

①から⑤を1セッションとし、各被験者は8セッション(ランプ4種類×照度2種類=8)を、日を変えランダム順序で3回評価した。被験者には美術館照明を想定した印象評価実験であることを事前に示し、以下の教示に基づいて評価させた。

「左ブースのサンプルの印象と比較して、右ブースのサンプルの印象がどう見えるかを評価してください。評価の際はサンプルのどこを観察していただいても構いません。サンプルの一部には絵を用いていますが、絵のデザインの良し悪しではなく、全体から受ける色の印象を答えるようにしてください。正しい答えがあるわけではありません。見たまま、感じたままに直感で答えてください」。

7.3.3 結果及び考察

(a) データ処理

第7.2.3 (a) と同様の処理を行った。

(b) 因子分析

本節で用いた赤色を含む観察対象物及び赤色を含まない観察対象物を用いた場合でも第6章と同様の評価構造が確認できるかを検証するために、被験者10人の評価値を用いて因子分析(主因子法、バリマックス回転)を行った。700 lxの結果(光源4×観察対象物7×被験者10=280データセット)及び10 lxの結果(光源4×観察対象物7×被験者10=280データセット)に対する因子分析結果を表7-11に示す。“鮮やかさ”や“明るさ”などに関連する第1因子、“好ましさ”や“美しさ”に関連する第2因子が抽出された(第2因子までの累積寄与率700 lx: 83 %、10 lx: 67 %)。グルーピングされた評価形容詞対は第6章で示した“色の質の因子”、“好ましさの因子”とほぼ同様の結果であることから、第1因子は“色の質の因子”、第2因子は“好ましさの因子”と解釈できる。

すなわち、本項で抽出した“色の質の因子”も第6章で定義した「色質」と同義であることが示された。

表 7-11 各照明下での因子分析結果

左：700 lx、右：10 lx

700 lx			10 lx		
評価形容詞対	因子負荷量		評価形容詞対	因子負荷量	
	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”		第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”
活気のあるー活気のない	-0.940	-0.222	派手なー地味な	-0.859	-0.352
派手なー地味な	-0.924	-0.275	鮮やかなーくすんだ	-0.831	-0.373
鮮やかなーくすんだ	-0.913	-0.330	動的なー静的な	-0.819	-0.347
動的なー静的な	-0.900	-0.365	明るいー暗い	-0.770	-0.348
明るいー暗い	-0.896	-0.301	澄んだー濁った	-0.754	-0.443
澄んだー濁った	-0.870	-0.391	活気のあるー活気のない	-0.746	-0.429
暖かいー涼しい	-0.805	-0.331	軽いー重い	-0.717	-0.366
軽いー重い	-0.790	-0.266	快適なー不快な	-0.323	-0.854
好きなー嫌いな	-0.161	-0.837	好きなー嫌いな	-0.279	-0.826
美しいー汚い	-0.379	-0.824	美しいー汚い	-0.388	-0.792
快適なー不快な	-0.281	-0.783	暖かいー涼しい	-0.367	-0.183
寄与率	59.6	23.5	寄与率	41.3	25.8
累積寄与率	59.6	83.1	累積寄与率	41.3	67.1

(c) 観察対象物の違いが色彩印象に与える影響

各照明下における各評価形容詞対の主観評価値（被験者全平均値）を表 7-12 に示し、標準偏差を表 7-13 に示す。図 7-17 は各照明下の観察対象物ごとの主観評価プロフィールであり、1～5 は赤色を含む観察対象物 pairRG、pairRB、mosaic、picRG、picRR、6～7 は赤色を含まない観察対象物 pairBG、picBG の結果である（上段 700 lx、下段 10 lx）。縦軸は本項（b）因子分析で抽出された 2 因子ごとに並べた評価形容詞対であり、横軸は被験者全平均値である。

図 7-17 の 700 lx の各主観評価プロフィールに示す実線（黒色）は左右ブースとも FL-EDL700 lx 照明下で行われた評価の結果であり、すべての観察対象物、各評価形容詞対で“0”近傍、すなわち“どちらでもない”と評価されていた。これは本実験の両眼隔壁法による評価が、左右眼の評価差なくほぼ正確に行われたことを意味している。

図 7-17 の赤色を含む観察対象物の主観評価プロフィールと赤色を含まない観察対象物の主観評価プロフィールを比較すると、その傾向は 2 グループで大きく異なっていることが明らかであり、すなわち赤色を含む場合と赤色を含まない場合で主観評価に大きな違いが生じた。

赤色を含む観察対象物の場合、「派手なー地味な」、「鮮やかなーくすんだ」など“色の

質の因子”は光源間で評価の傾向が異なっている。特にLED-RGBとその他の光源間の評価に差が生じており、700 lx、10 lxともにLED-RGBが他の光源よりも“明るい”，“派手な”，“鮮やかな”と評価されている。「美しいー汚い」など“好ましさの因子”は光源間の評価差が僅かであった。

赤色を含まない観察対象物の場合、“色の質の因子”、“好ましさの因子”ともに光源間の評価差が僅かであった。

次に、図 7-17 の主観評価プロフィールにおけるプロフィール形状の類似性を比較するために、2色配色（pairRG、pairBG、pairRB）、及び絵（picRG、picBG、picRR）の照明条件ごとの主観評価プロフィール曲線間の相関係数を計算した（表 7-14）。700 lxでは、2色配色、絵ともに赤色を含む観察対象物同士の場合は高い相関を示したが（ $R=0.78\sim0.98$ 、すべて 1%有意）、赤色を含む観察対象物と含まない観察対象物の相関係数は低い（ $R=0.04\sim0.48$ ）。10 lxでは、2色配色、絵ともに多くの照明条件において高い相関が見られたが（ $R=0.77\sim0.99$ 、すべて 1%有意）、これは照度低下に伴って明るさや鮮やかさが低下したことにより光源の演色性の違いがほとんどなくなったためだと考えられる。但し、LED-RGBは 10 lxにおいても赤色を含む場合、含まない場合で相関の高低に違いが認められた（pairRG/pairRB： $R=0.88$ 、picRG/picRR： $R=0.85$ 、1%有意）。

観察対象物の種類の影響、すなわち2色配色と絵の影響については、図 7-17、表 7-14にも示すように2色配色と絵の傾向は類似しており、主観評価プロフィール曲線間に有意な差は認められなかった。これは、異なる照明下における演色性評価が観察対象物の種類（画材も含む）の違いよりも含まれている色の構成色（色相）により影響を受けていたことを意味している。

本節の実験結果で得られた赤色の重要性については、既往研究の報告^{7-5) ~7-13)}及び第 7.2 節の結果とも一致する。赤色の影響についてさらに検証するため、多色配色（mosaic）とその他の赤色を含む観察対象物（pairRG、pairRB、picRG、picRR）の主観評価プロフィール形状の類似性を相関係数で比較評価した（表 7-15）。多色配色（mosaic）とその他の赤色を含む観察対象物（pairRG、pairRB、picRG、picRR）には、照明条件によらず高い相関が認められた（700 lx： $R=0.65\sim0.98$ 、10 lx： $R=0.64\sim0.97$ 、5%ないし 1%有意）。この結果は、多色配色の色彩印象が、各色に対する評価の加算や平均ではなく、特に赤色の影響を強く受けて評価されていたことを示している。

表 7-12 各照明下の主観評価値（被験者全平均値）

因子名		“色の質”									“好ましき”		
評価形容詞対		活気のある/ 活気のない	派手な/ 地味な	鮮やかな/ くすんだ	動的な/ 静的な	明るい/ 暗い	澄んだ/ 濁った	暖かい/ 涼しい	軽い/ 重い	好きな/ 嫌いな	美しい/ 汚い	快適な/ 不快な	
照明 条件	EDL700	1 pairRG	0.13	0.10	0.03	0.03	-0.03	0.07	0.03	0.10	0.03	-0.07	0.10
		2 pairRB	0.13	0.10	0.20	0.13	0.10	0.13	-0.03	0.10	0.03	0.03	0.07
		3 mosaic	-0.10	0.03	-0.03	0.00	-0.07	-0.03	-0.03	0.00	0.00	0.07	0.03
		4 picRG	0.07	0.00	-0.03	0.03	0.03	0.13	-0.10	0.17	0.07	0.07	0.03
		5 picRR	0.07	0.00	-0.03	0.03	0.03	0.13	-0.10	0.17	0.07	0.07	0.03
		6 pairBG	0.10	0.03	-0.07	-0.03	0.00	-0.03	-0.03	0.03	0.17	0.10	0.03
		7 picBG	-0.03	0.03	0.03	0.00	0.03	0.10	-0.03	0.07	0.13	0.13	0.17
	BY700	1 pairRG	-0.83	-0.90	-0.90	-0.93	-0.70	-0.70	-0.40	-0.70	-0.27	-0.67	-0.50
		2 pairRB	-0.77	-0.77	-0.77	-0.57	-0.63	-0.83	-0.47	-0.50	-0.20	-0.47	-0.50
		3 mosaic	-0.77	-0.80	-0.70	-0.77	-0.43	-0.57	-0.47	-0.37	-0.17	-0.27	-0.50
		4 picRG	-0.93	-0.93	-0.93	-0.80	-0.73	-0.77	-0.67	-0.70	0.10	-0.43	-0.07
		5 picRR	-1.03	-1.03	-1.15	-0.97	-0.93	-1.00	-0.80	-0.73	-0.20	-0.77	-0.50
		6 pairBG	-0.10	-0.10	-0.17	-0.40	-0.43	-0.03	-0.77	-0.30	0.30	0.07	0.23
		7 picBG	0.07	0.03	0.43	-0.13	-0.17	0.30	-0.63	-0.20	0.50	0.47	0.47
	WW700	1 pairRG	-1.23	-1.37	-1.53	-1.17	-1.03	-1.13	-0.83	-1.03	-0.77	-1.23	-0.70
		2 pairRB	-1.00	-1.17	-1.23	-1.20	-1.00	-0.97	-0.63	-0.67	-0.73	-1.07	-0.63
		3 mosaic	-1.20	-1.23	-1.43	-1.43	-1.20	-1.33	-1.07	-1.00	-0.57	-0.67	-0.57
		4 picRG	-1.30	-1.40	-1.63	-1.27	-1.37	-1.40	-0.70	-1.30	-0.30	-1.00	-0.33
		5 picRR	-1.33	-1.30	-1.73	-1.20	-1.40	-1.53	-0.60	-1.10	-0.30	-0.80	-0.27
		6 pairBG	-0.57	-0.53	-0.70	-0.53	-0.73	-0.43	-0.73	-0.50	0.20	0.00	0.07
		7 picBG	0.27	0.33	0.40	0.23	-0.07	0.40	-0.70	0.33	0.63	0.47	0.57
	RGB700	1 pairRG	2.30	2.60	2.60	2.40	2.20	2.17	1.43	1.53	0.03	0.60	0.23
		2 pairRB	2.40	2.57	2.47	2.30	1.93	1.70	1.03	1.03	0.00	0.60	0.13
		3 mosaic	2.03	2.10	2.67	2.17	1.90	2.07	1.50	1.40	0.27	0.80	0.57
		4 picRG	2.27	2.57	2.47	2.37	2.23	2.10	1.10	1.63	0.10	0.83	0.40
		5 picRR	2.03	2.37	2.69	1.90	1.77	1.83	1.20	1.07	0.90	0.97	0.33
		6 pairBG	0.27	0.13	0.23	0.27	0.23	0.13	0.10	0.07	0.20	0.20	0.20
		7 picBG	0.40	-0.07	-0.07	0.10	0.10	-0.07	-0.23	-0.13	-0.03	0.10	0.10
	EDL10	1 pairRG	-2.23	-2.47	-2.47	-2.03	-2.37	-2.13	-1.37	-1.93	-1.57	-1.97	-1.70
		2 pairRB	-2.27	-2.47	-2.40	-2.03	-2.40	-2.23	-0.97	-2.10	-1.80	-1.97	-1.90
		3 mosaic	-2.27	-2.37	-2.37	-2.00	-2.37	-2.10	-1.03	-1.90	-1.27	-1.53	-1.30
		4 picRG	-2.20	-2.33	-2.47	-2.03	-2.43	-2.13	-0.93	-1.93	-1.47	-1.70	-1.53
5 picRR		-2.43	-2.43	-2.43	-2.13	-2.50	-2.33	-1.20	-2.00	-1.73	-1.90	-1.73	
6 pairBG		-2.33	-2.57	-2.73	-2.50	-2.43	-2.53	-1.37	-2.07	-1.20	-1.70	-1.37	
7 picBG		-2.00	-2.27	-2.50	-2.17	-2.47	-1.90	-1.20	-2.17	-1.10	-1.30	-1.50	
BY10	1 pairRG	-2.50	-2.63	-2.83	-2.60	-2.67	-2.57	-1.30	-2.50	-1.77	-2.23	-2.07	
	2 pairRB	-2.53	-2.73	-2.87	-2.60	-2.70	-2.70	-1.13	-2.53	-1.60	-2.10	-2.03	
	3 mosaic	-2.47	-2.67	-2.73	-2.60	-2.77	-2.53	-1.27	-2.50	-1.63	-1.93	-1.73	
	4 picRG	-2.50	-2.53	-2.63	-2.47	-2.77	-2.37	-0.90	-2.67	-1.60	-2.00	-1.77	
	5 picRR	-2.33	-2.57	-2.70	-2.43	-2.77	-2.50	-1.57	-2.33	-1.53	-1.77	-1.53	
	6 pairBG	-2.80	-2.80	-2.80	-2.70	-2.73	-2.63	-1.43	-2.53	-1.63	-2.10	-2.13	
	7 picBG	-2.47	-2.50	-2.63	-2.57	-2.83	-2.50	-1.33	-2.63	-1.30	-1.97	-1.87	
WW10	1 pairRG	-2.47	-2.77	-2.70	-2.47	-2.60	-2.57	-0.87	-2.43	-1.87	-2.10	-1.97	
	2 pairRB	-2.53	-2.63	-2.63	-2.37	-2.63	-2.57	-0.87	-2.23	-1.57	-1.87	-1.83	
	3 mosaic	-2.57	-2.53	-2.80	-2.43	-2.63	-2.50	-1.37	-2.40	-1.67	-1.93	-1.60	
	4 picRG	-2.50	-2.57	-2.63	-2.57	-2.73	-2.47	-1.33	-2.57	-1.60	-1.73	-1.70	
	5 picRR	-2.57	-2.67	-2.80	-2.57	-2.93	-2.73	-1.83	-2.40	-1.80	-2.00	-1.67	
	6 pairBG	-2.53	-2.67	-2.67	-2.67	-2.60	-2.60	-1.47	-2.40	-1.57	-1.73	-1.43	
	7 picBG	-2.20	-2.53	-2.60	-2.20	-2.70	-2.40	-1.13	-2.37	-1.30	-1.43	-1.40	
RGB10	1 pairRG	-0.33	0.00	0.03	-0.17	-0.97	0.03	0.33	-0.67	-0.17	-0.27	-0.30	
	2 pairRB	-0.30	-0.03	-0.23	-0.27	-0.97	-0.33	0.27	-0.80	-0.60	-0.60	-0.70	
	3 mosaic	-0.37	-0.13	-0.07	0.10	-1.20	-0.67	0.30	-0.73	-0.20	-0.37	-0.33	
	4 picRG	-0.27	-0.10	0.00	-0.23	-0.97	-0.33	0.30	-0.70	0.13	-0.20	-0.07	
	5 picRR	-0.87	-0.73	-0.70	-0.93	-1.07	-0.87	-0.30	-0.93	-0.47	-0.60	-0.43	
	6 pairBG	-1.90	-1.83	-1.90	-1.83	-1.60	-1.67	-0.70	-1.23	-0.57	-0.97	-0.63	
	7 picBG	-1.80	-1.80	-1.97	-1.53	-1.80	-1.50	-0.33	-1.60	-0.63	-0.90	-0.77	

表 7-13 各照明下の主観評価値に対する標準偏差

因子名			“色の質”								“好ましさ”		
評価形容詞対			活気のある/ 活気のない	派手な/ 地味な	鮮やかな/ くすんだ	動的な/ 静的な	明るい/ 暗い	澄んだ/ 濁った	暖かい/ 涼しい	軽い/ 重い	好きな/ 嫌いな	美しい/ 汚い	快適な/ 不快な
照明 条件	EDL700	1 pairRG	0.43	0.40	0.41	0.41	0.55	0.36	0.41	0.54	0.31	0.36	0.40
		2 pairRB	0.43	0.30	0.40	0.34	0.47	0.43	0.31	0.40	0.48	0.48	0.44
		3 mosaic	0.47	0.48	0.41	0.52	0.57	0.48	0.55	0.52	0.26	0.36	0.48
		4 picRG	0.36	0.37	0.41	0.41	0.41	0.34	0.47	0.45	0.51	0.36	0.41
		5 picRR	0.36	0.37	0.41	0.41	0.41	0.34	0.47	0.45	0.51	0.36	0.41
		6 pairBG	0.40	0.31	0.44	0.31	0.45	0.31	0.55	0.60	0.45	0.40	0.48
		7 picBG	0.18	0.18	0.41	0.00	0.31	0.40	0.41	0.36	0.34	0.34	0.37
	BY700	1 pairRG	0.37	0.30	0.30	0.36	0.64	0.46	0.76	0.64	0.68	0.47	0.56
		2 pairRB	0.42	0.42	0.50	0.62	0.66	0.37	0.72	0.92	0.70	0.56	0.62
		3 mosaic	0.42	0.40	0.53	0.50	0.76	0.67	0.67	0.91	0.64	0.51	0.50
		4 picRG	0.25	0.25	0.25	0.40	0.63	0.42	0.65	0.69	0.75	0.72	0.77
		5 picRR	0.31	0.18	0.36	0.18	0.44	0.00	0.40	0.63	0.75	0.56	0.67
		6 pairBG	0.75	0.83	0.86	0.66	0.76	0.71	0.50	0.94	0.69	0.68	0.67
		7 picBG	0.68	0.75	0.72	0.76	0.82	0.69	0.48	0.83	0.62	0.62	0.67
	WW700	1 pairRG	0.56	0.60	0.56	0.45	0.71	0.62	0.64	0.71	0.84	0.42	0.97
		2 pairRB	0.45	0.52	0.56	0.48	0.73	0.80	0.84	1.04	0.77	0.51	0.87
		3 mosaic	0.40	0.56	0.62	0.62	0.40	0.54	0.63	0.58	0.92	0.87	1.02
		4 picRG	0.46	0.49	0.48	0.44	0.48	0.49	0.86	0.46	1.13	0.89	1.01
		5 picRR	0.54	0.46	0.44	0.40	0.49	0.50	0.84	0.30	0.94	0.95	0.89
		6 pairBG	0.72	0.67	0.64	0.72	0.81	0.84	0.81	0.85	0.91	0.77	0.73
		7 picBG	0.68	0.65	0.66	0.76	0.85	0.76	0.64	0.83	0.71	0.81	0.76
	RGB700	1 pairRG	0.59	0.55	0.49	0.55	0.65	0.52	1.02	0.72	1.43	1.31	1.41
		2 pairRB	0.55	0.50	0.50	0.64	0.63	0.59	1.28	0.75	1.53	1.31	1.38
		3 mosaic	0.48	0.65	0.54	0.52	0.54	0.68	0.76	0.66	1.03	1.28	1.31
		4 picRG	0.44	0.50	0.50	0.55	0.50	0.47	1.42	0.60	0.98	1.07	1.11
		5 picRR	0.41	0.66	0.46	0.60	0.76	0.73	0.91	0.81	1.08	0.91	1.11
		6 pairBG	1.03	0.85	0.99	0.85	0.88	0.96	0.70	1.00	0.98	0.91	0.87
		7 picBG	0.92	0.73	0.81	0.94	0.79	0.93	0.88	0.88	0.84	0.87	0.87
	EDL10	1 pairRG	0.50	0.50	0.50	0.41	0.55	0.50	1.02	0.57	0.76	0.31	0.64
		2 pairRB	0.51	0.56	0.55	0.60	0.49	0.42	1.45	0.47	0.54	0.60	0.60
		3 mosaic	0.57	0.60	0.55	0.52	0.55	0.60	1.45	0.75	1.00	0.99	1.04
		4 picRG	0.48	0.47	0.50	0.48	0.62	0.43	1.44	0.63	0.96	0.90	0.81
		5 picRR	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.47	1.11	0.63	0.73	0.54	0.68
		6 pairBG	0.65	0.50	0.44	0.50	0.50	0.50	1.28	0.51	1.08	1.04	1.14
		7 picBG	0.58	0.44	0.50	0.37	0.50	0.79	0.98	0.82	1.04	0.82	0.56
BY10	1 pairRG	0.56	0.48	0.37	0.49	0.47	0.50	1.53	0.50	0.76	0.67	0.81	
	2 pairRB	0.67	0.44	0.34	0.55	0.46	0.46	1.45	0.56	0.95	0.60	0.84	
	3 mosaic	0.62	0.47	0.44	0.49	0.42	0.50	1.26	0.67	1.20	0.85	0.96	
	4 picRG	0.50	0.50	0.48	0.56	0.42	0.48	1.60	0.47	0.99	0.73	0.84	
	5 picRR	0.83	0.56	0.46	0.56	0.42	0.50	1.09	0.54	1.02	0.67	1.06	
	6 pairBG	0.40	0.40	0.40	0.46	0.44	0.71	1.54	0.50	0.91	0.70	0.67	
	7 picBG	0.62	0.50	0.48	0.50	0.37	0.50	1.37	0.48	1.07	0.66	0.72	
WW10	1 pairRG	0.67	0.42	0.46	0.67	0.49	0.50	1.50	0.56	0.62	0.75	0.80	
	2 pairRB	0.56	0.55	0.48	0.60	0.48	0.50	1.48	0.56	0.84	0.43	0.58	
	3 mosaic	0.50	0.50	0.40	0.50	0.48	0.50	1.25	0.55	1.01	1.03	0.95	
	4 picRG	0.50	0.50	0.48	0.62	0.44	0.56	1.30	0.56	1.08	1.09	1.00	
	5 picRR	0.62	0.47	0.40	0.50	0.25	0.44	0.64	0.55	0.65	0.37	0.75	
	6 pairBG	0.50	0.47	0.47	0.54	0.49	0.49	1.50	0.55	1.09	1.00	1.09	
	7 picBG	0.48	0.50	0.49	0.54	0.46	0.49	1.31	0.48	0.94	0.92	0.92	
RGB10	1 pairRG	0.79	0.89	0.87	0.93	0.60	0.98	1.01	0.79	0.97	0.93	0.90	
	2 pairRB	0.90	0.91	0.92	0.96	0.55	0.87	1.00	0.60	0.84	0.84	0.86	
	3 mosaic	0.84	0.81	0.85	0.87	0.60	0.47	1.46	0.68	1.19	0.84	0.75	
	4 picRG	0.93	0.70	0.82	0.88	0.60	0.60	1.22	0.59	0.99	0.95	0.93	
	5 picRR	0.50	0.44	0.46	0.25	0.36	0.43	1.04	0.36	0.92	0.84	0.84	
	6 pairBG	0.54	0.69	0.70	0.64	0.61	0.79	1.19	0.42	1.17	1.02	1.02	
	7 picBG	0.54	0.40	0.41	0.56	0.48	0.62	1.19	0.49	1.11	0.98	0.96	

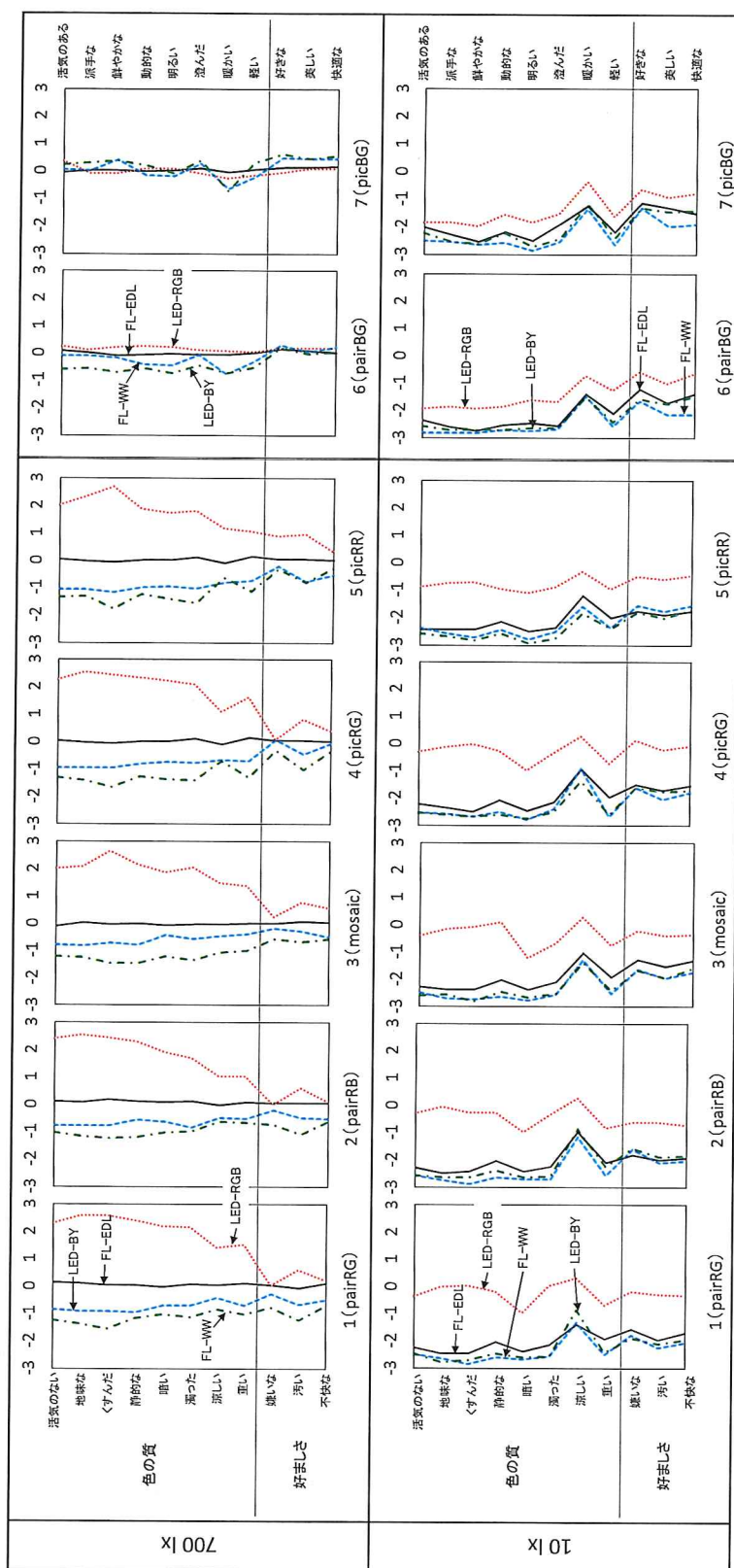


図 7-17 観察対象物ごとの主観評価プロフィール（被験者全平均値）

上段：700 lx、下段：10 lx

No.1～No.5：赤色を含む観察対象物、No.6～No.7：赤色を含まない観察対象物

表 7-14 2色配色 (pairRG、pairBG、pairRB)

および絵 (picRG、picBG、picRR) の主観評価プロフィール間の相関係数

** : 1%有意

観察対象物のカテゴリー(色相の組み合わせ)		BY700	WW700	RGB700	EDL10	BY10	WW10	RGB10
2色配色	pairRG vs. pairBG (赤-緑 vs. 青-緑)	0.21	0.48	0.13	0.91**	0.97**	0.85**	0.09
	pairRB vs. pairBG (赤-青 vs. 青-緑)	0.19	0.35	0.28	0.77**	0.98**	0.90**	-0.17
	pairRG vs. pairRB (赤-緑 vs. 赤-青)	0.78**	0.88**	0.98**	0.92**	0.99**	0.98**	0.88**
絵	picRG vs. picBG (赤-緑 vs. 青-緑)	0.46	0.06	0.14	0.90**	0.95**	0.98**	0.59
	picRR vs. picBG (赤-赤 vs. 青-緑)	0.28	0.04	0.07	0.84**	0.93**	0.96**	0.84**
	picRG vs. picRR (赤-緑 vs. 赤-赤)	0.96**	0.98**	0.90**	0.99**	0.89**	0.94**	0.85**

表 7-15 多色配色 (mosaic) と赤色を含む観察対象物の主観評価プロフィール間の相関係数

* : 5%有意、** : 1%有意

観察対象物	BY700	WW700	RGB700	EDL10	BY10	WW10	RGB10
mosaic vs. pairRG	0.79**	0.68*	0.98**	0.97**	0.97**	0.91**	0.83**
mosaic vs. pairRB	0.79**	0.65*	0.95**	0.89**	0.97**	0.95**	0.80**
mosaic vs. picRG	0.75**	0.85**	0.96**	0.98**	0.97**	0.97**	0.89**
mosaic vs. picRR	0.78**	0.88**	0.92**	0.97**	0.96**	0.96**	0.64*

(d) 色彩印象評価で注目する色相

主観評価実験の結果、観察対象物に赤色を含むか含まないかによって色彩印象評価が異なっていたことから、赤色が色彩印象評価において重要であることが示された。しかし、多色配色 (mosaic) を評価したとき「どの色に注目して評価するのか」、「色の見えが大きく変化した色が存在した場合、その色の影響をどの程度受けて評価するのか」については明らかではない。これらの点を検討するため、多色配色 (mosaic) の色の見えを評価したときに「注目した色」、及び「参照光源下の色と比較して、変化して見える色」はどの色なのかを調べた。多色配色 (mosaic) を評価するとき被験者に以下の2種類の設問に対する内観評価を実施した。設問は、

- (1) 評価の時に注目していた色を1色だけ答えてください。
- (2) 参照光源下の色と比べて変化して見える色を3色答えてください。

の2種類である。

各照明下における設問 (1) に対する結果 (注目したと回答された色相の割合) を図 7-18

に示す。図 7-18 に示されるように「注目した色」は照明条件に関係なく、その傾向が極めて類似しており、全回答の 63 %～77 %が「注目した色」を赤色と回答した。表 7-16 は全 20 色における回答数の上位 2 位を示したものであるが、どの照明条件でも回答数が多かった色は 4 種類の赤色の中で最も粒子径の小さい高彩度の赤色（辰砂白番）であった。赤色の次に注目された色は青色、緑色で 3 %～23 %であり、黄色、金色については 7 %以下であった。すなわち「注目した色」は各照明下での演色性に関係なく赤色であり、その他の色相については注目度が低いことが明らかになった。

次に、設問（2）に対する結果（変化したと回答された色相の割合）を図 7-19 に示す。図 7-19 の「変化した色」に対する被験者の回答は、照明条件によって大きくばらついていた。

上記の内観評価と各照明下の演色性を比較評価するために、各照明下における多色配色（mosaic）4 色（表 7-10、赤 1・黄 1・緑 1・青 1）を測色的（CIECAM02 ambM）に解析した。図 7-19（a）、（b）、（c）、（d）は各光源 700 lx、10 lx 下で色が参照光源 FL-EDL700 lx 下の色とどのようににずれているかを示し、原点（無彩色）に近いほどくすんだ（低カラフルネスな）色であることを意味する。なお各図に示す■（塗りつぶし四角）は参照光源 FL-EDL700 lx の点であり、各色付きのシンボル（▲、◆、●）は各光源 700 lx の点、及び白抜きシンボルは各光源 10 lx の点である。

光源ごとの特徴について考察すると、図 7-20（a）FL-EDL の場合、10 lx ではどの色相においても ambM 値が低下しているが、色相の変化は僅かである。図 7-20（b）LED-BY 及び（c）FL-WW の場合、700 lx でも FL-EDL700 lx に比べ赤色、緑色の ambM 値が低下し、さらに 10 lx では低下が特に著しい。LED-BY は各色の色相ずれが僅かであるが、FL-WW の場合、黄色は緑み方向へ、青色はより青色方向へ色相がずれている。図 7-20（d）LED-RGB の場合、700 lx 下での赤色、緑色は FL-EDL700 lx に比べ ambM 値が増加し、10 lx では FL-EDL700 lx とほぼ同じ位置である。黄色、青色は 700 lx、10 lx とともに色相ずれが大きく、黄色は赤み方向へ、青色は緑み方向へずれ、10 lx の場合、ambM 値は FL-EDL700 lx 点よりも低下している。

内観評価結果と測色結果を比較すると、「変化した色」については 700 lx 及び 10 lx ともに内観評価結果は測色結果とほぼ対応している。これに対し「注目した色」については LED-RGB700 lx だけが赤色を鮮やかに（高カラフルネス）演色し、逆に FL-EDL10 lx、LED-BY700 lx・10 lx、FL-WW700 lx・10 lx では赤色がくすんで（低カラフルネス）演色されていた。すなわち赤色が最も注目した色という結果は赤色の鮮やかさだけでは説明ができない。

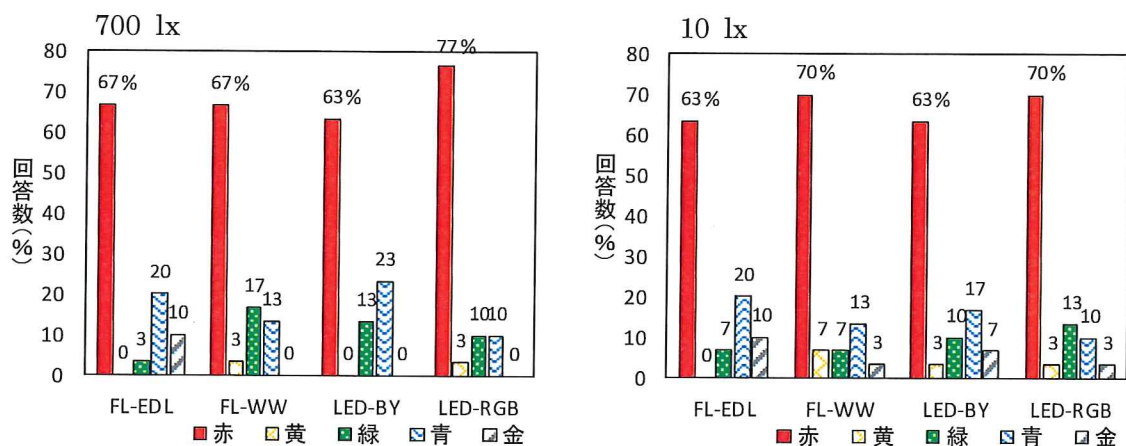


図 7-18 「注目した色」と回答した割合

表 7-16 「注目した色」の回答数上位 2 色

700 lx						10 lx					
照明条件	順位	回答数	%	色票名	No.	照明条件	順位	回答数	%	色票名	No.
EDL700	1	17	57	辰砂白	赤1	EDL10	1	10	33	辰砂白	赤1
	2	4	13	群青5	青4		2	4	13	辰砂9	赤3
BY700	1	11	37	辰砂白	赤1	BY10	1	9	30	辰砂5	赤4
	2	8	27	辰砂5	赤4		2	8	27	辰砂白	赤1
WW700	1	12	40	辰砂白	赤1	WW10	1	12	40	辰砂5	赤4
	2	5	17	辰砂5	赤4		2	7	23	辰砂白	赤1
RGB700	1	21	70	辰砂白	赤1	RGB10	1	15	50	辰砂白	赤1
	2	3	10	緑青9	青3		2	6	20	辰砂5	赤4

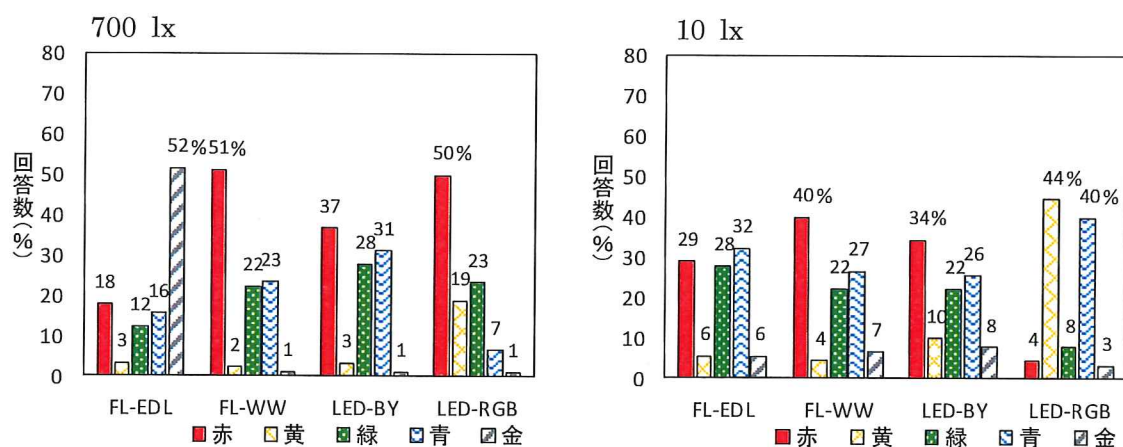


図 7-19 参照光源下の多色配色に対してテスト光源下で「変化した色」と回答した割合

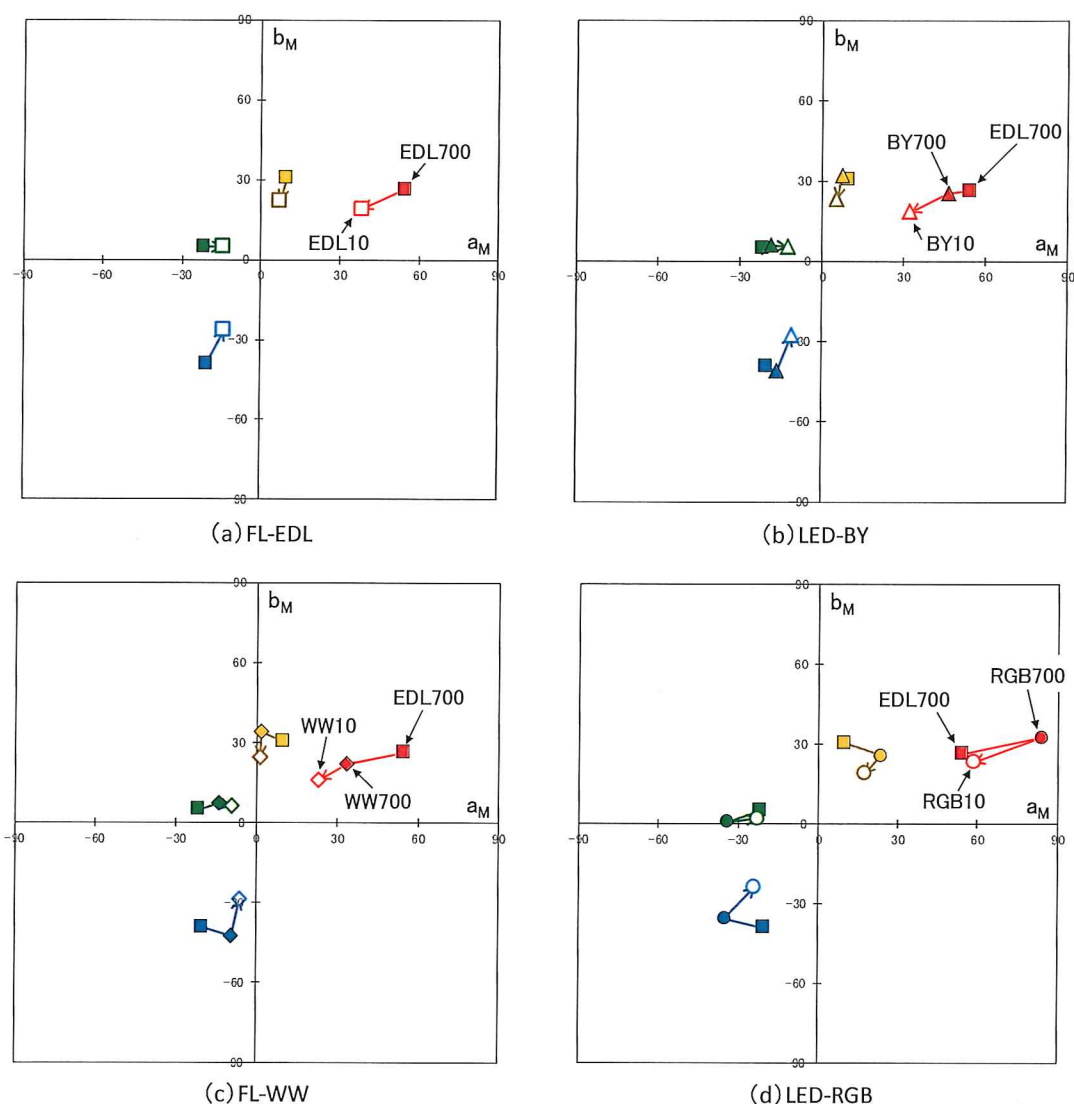


図 7-20 参照光源 FL-EDL700 lx 下の色に対する色ずれ (700 lx、10 lx)

(a) : FL-EDL、(b) : LED-BY、(c) : FL-WW、(d) : LED-RGB

「注目した色」と“誘目性”、“目立ち”の関係について考察する。“誘目性”や“目立ち”に関する諸研究においても赤色が“誘目性”や“目立ち”の高い色であることが示されている。

角野⁷⁻²¹⁾は照明の演色効果による部屋の住み心地の変化について考察し、住み心地の変化が肌色、色から他の重要な属性が類推されるもの（たとえば、食べ物）、アクセント色など「注目する色」の影響を受けると述べている。

神作らは⁷⁻²²⁾安全色彩に対する誘目性を実験検討し、背景が中灰色の場合に最も誘目性が高い色は黄色であり、次いで赤色、白色、黄赤色、赤紫色、黒の順であること、さらに緑色や青色については誘目性が低いことを示した。芦澤ら⁷⁻¹⁶⁾、^{7-23~7-25)}の色の目立ちに関する一

連の研究では、色の目立ちが色相や彩度の影響を受けることや、視環境の照度によって変化することを明らかにしており、100 lx 以上の明るいところでは赤色が最も目立つ色であることを報告している。また芦澤ら⁷⁻¹⁶⁾は色の目立ちと面積効果についても検討しており、面積が同じ場合は他の色相よりも赤色が目立ち、さらに赤色は面積が小さくなっても面積の大きい青色や緑色より目立つと述べている。神作や芦澤らが色票の誘目性や目立ちを検討したのに対し、須長ら⁷⁻¹⁷⁾は自然情景画像に対する「色の目立ちの要因」を調べており、画像に赤系等の色が含まれている場合はその色が優位に目立つことを明らかにしている。

本節の「注目した色」の結果は、高彩度に演色された場合も、低彩度に演色された場合も、また高照度でも低照度でも赤色であり、すなわち照明条件によらず多くの被験者が赤色に注目していた。この結果は上記の既往研究と同じである。多色配色における誘目性は「目立ち易さ（印象に残った）の程度」として求めることができることも述べられており⁷⁻²¹⁾、本節の「注目した色」もこれと同じように「最も印象に残り、目が自然とそちらへ向く色」として赤色が回答されたのではないかと考える。

7.3.4 結論

本節から以下の結論を得た。

- (1) 異なる照明下での色彩印象が“色の質の因子”で評価できるという第6章の結論を再確認した。
- (2) 異なる照明下での“色の質の因子”は、観察対象物に赤色が含まれるか否かによって大きく変化した。
- (3) 多色配色を観察したとき「注目した色」は照明条件に関係なく赤色である。
- (4) 観察対象物に赤色を含むか否かによって異なる照明下における色彩印象が大きく異なるということは、逆に赤色を全く含まない場合は、光源の違いを効果的に表すことができないことを意味している。すなわち光源の違いを明確にするためには、赤色を含む観察対象物を“色の質の因子”の形容詞対で評価することが有効であると解釈できる。

なお本章では赤色の重要性を示したが、観察対象物に占める赤色の面積の影響については検討していない。美術館用光源がどのような演色特性を有すべきかを判断するためには、その点も明らかにしなければならない。次節では、観察対象物に占める赤色の面積の影響について検討する。

7.4 実験3（観察対象物に含まれる赤色の面積の影響）

7.4.1 はじめに

第7.2節及び第7.3節で記述したように異なる照明下での色彩印象は観察対象物の色相によって異なり、赤色系の色相が最も照明の影響を受けることを確認した。しかし、第7.2節及び第7.3節の実験で用いた観察対象物は、観察対象物に含まれる赤色の面積を考慮しておらず、面積を段階的に変化させたときに「色質」がどのように変化するのは明らかになっていない。

第7.2節で挙げた既往研究ではさまざまな色相を含んだ有彩色物体群、もしくは有彩色物体群の中から観察対象物をひとつひとつ評価しており、観察対象物に占める色の面積の影響を検討した研究例はない。

色の目立ちと観察対象物の色相、面積の影響については芦澤ら^{7・16)}の報告がある。芦澤らは、12色相の色票の面積を4段階に変化させた計48種類の色票を用いて、目立つ順に順位付けを行った。その結果、同一面積の場合は赤色系の色が目立つこと、小さな面積の赤色系の色と大きな面積のその他の色では赤色系の色の方が目立つことを明らかにした。

色の面積は主観評価結果に影響することから、光源の演色性の違いによる観察対象物の色彩印象は観察対象物に含まれる特定の色の面積の影響を受けると考えられる。

本節では「異なる照明下の色質は観察対象物に含まれる赤色面積によって変化する」と仮説を立て、第7.2節で最も演色性の影響を受けやすいことを確認した赤色の面積を段階的に変化させ、面積の影響を主観評価実験により検討した。

7.4.2 実験

(a) 実験方法

実験は第7.2節及び第7.3節と同様に両眼隔壁法によって行い、左眼で観察する美術館用蛍光灯（パナソニック社製 FL20S・L-EDL・NU）700 lx 下での観察対象物の色彩印象を基準に、右眼で観察するテスト照明条件下の観察対象物の色彩印象を比較評価した。

被験者は女性18名（18歳～49歳）である。4名は色彩評価に習熟した学生であり、13名は美術制作、美術教育を学ぶ学生であり、1名は色彩評価、美術制作の経験がない被験者である。眼鏡及びコンタクトレンズの使用制限は特に行わなかったが、日常的に視力矯正している被験者についてはその状態で実験に参加するよう教示した。

(b) 評価観察ブース

第7.2節及び第7.3節と同様の評価観察ブースを用いた。

(c) 評価形容詞対

第7.2節及び第7.3節と同様の評価形容詞対 11 種類、7 段階尺度を用いた。

(d) 照明条件

実験に用いた照明条件は第7.2節と同様であり、参照光源は美術館・博物館用の高演色形蛍光灯（FL-EDL）1種類、テスト光源は演色性の対照的なLEDランプ2種類（RGB3色LED混光タイプ：LED-RGB、青色LED励起黄色蛍光体タイプ：LED-BY）である。

照度は左右ブースの机上面照度 700 lx（高照度）、10 lx（低照度）とし、参照光源の照度は 700 lx 一定とした。

(e) 観察対象物

図7-21に観察対象物のイメージを示す。第7.2節と同様の橋本明治画伯『月庭』を「原図」として用いた。第7.2節では“色の質の因子”に最も影響する色相は高彩度の赤色（CIECAM02色相角 $h=25^\circ$ ）であることを明らかにした。本節では“色の質の因子”に対する赤色面積の影響を検討するために「原図」に赤色紅葉画像を付加し、これを増加させることによって赤色面積率を変化させた。赤色面積率は0.0、0.4、2.4、5.6、14.0 %の5段階とした。なお図7-21に示すように、紅葉画像は「原図」の主題である人物2名に重ならないよう人物の周囲に配置した。

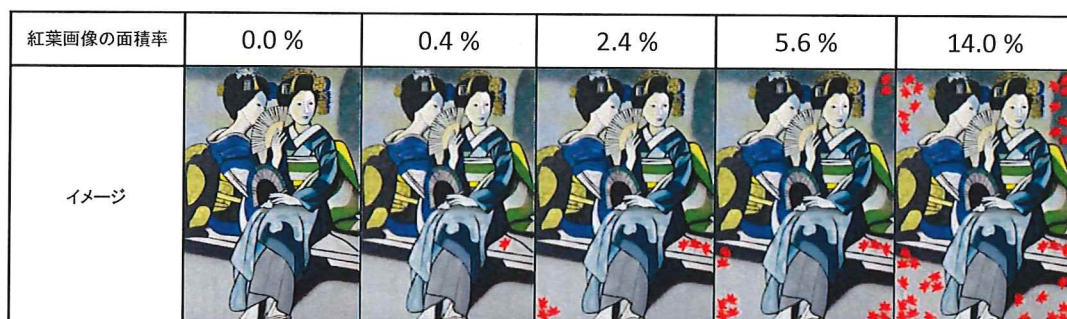


図 7-21 観察対象物

(f) 実験手順及び教示

実験手順は以下の通りである。

- ① 被験者は暗室に入室後、実験に関する教示を受ける。教示を含め、約5分間の暗順応を行う。
- ② 被験者は実験ブースの中央に着座し、顎台で頭部を固定する。左右の照明条件に対してそれぞれの目を1分から3分間順応させる。
- ③ 実験者が左右のブースの中央に同一の観察対象物を配置する。
- ④ 被験者は左右のそれぞれの眼で観察対象物を視野角45°の位置から観察し、実験者が読み上げた評価項目に対して口頭で回答する。回答はすべて実験者が用紙に記録する。
- ⑤ すべての観察対象物の評価が終了すると被験者は実験ブースから離れて待機し、実験者が照度ないしランプを変更した後、再び①からの手順を繰り返す。

①から⑤を1セッションとし、各被験者は4セッション(ランプ2種類×照度2種類=4)を、日を変えランダム順序で3回評価した。被験者には美術館照明を想定した印象評価実験であることを事前に示し、以下の教示に基づいて評価させた。

「左ブースのサンプルの印象と比較して、右ブースのサンプルの印象がどう見えるかを評価してください。評価の際はサンプルのどこを観察していただいても構いません。サンプルには絵を用いていますが、絵のデザインの良し悪しではなく、全体から受ける色の印象を答えるようにしてください。正しい答えがあるわけではありません。見たまま、感じたままに直感で答えてください」。

7.4.3 結果及び考察

(a) データ処理

第7.2.3項(a)及び第7.3.3項(a)と同様の処理を行った。

(b) 因子分析

本節で用いた赤色面積率の異なる観察対象物を用いた場合でも第6章と同様の評価構造が確認できるかを検証するために、被験者18人の評価値を用いて因子分析(主因子法、バリマックス回転)を行った。700 lx及び10 lxの結果(各照度、光源2×観察対象物5×被験者18=180データセット)に対する因子分析結果を表7-17に示す。

第6章と同様に“鮮やかさ”や“明るさ”などに関係する第1因子、“好ましさ”や“美しさ”に関係する第2因子が抽出された（第2因子までの累積寄与率 700 lx : 74 %、10 lx : 65 %）。グルーピングされた評価形容詞対は第6章で示した“色の質の因子”、“好ましさの因子”とほぼ同様の結果であることから、第1因子は“色の質の因子”、第2因子は“好ましさの因子”と解釈できる。

すなわち本項で抽出した“色の質の因子”も第6章で定義した「色質」と同義であることが示された。

表 7-17 各照明下での因子分析結果

左 : 700 lx、右 : 10 lx

700 lx			10 lx		
評価形容詞対	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”	評価形容詞対	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”
派手な－地味な	-0.95	0.18	派手な－地味な	-0.90	0.24
動的な－静的な	-0.94	0.15	鮮やかな－くすんだ	-0.87	0.28
鮮やかな－くすんだ	-0.93	0.22	澄んだ－濁った	-0.87	0.33
活気のある－活気のない	-0.93	0.17	動的な－静的な	-0.84	0.24
澄んだ－濁った	-0.90	0.25	明るい－暗い	-0.79	0.30
明るい－暗い	-0.88	0.23	活気のある－活気のない	-0.79	0.23
軽い－重い	-0.78	0.37	軽い－重い	-0.73	0.15
快適な－不快な	-0.11	0.90	好きな－嫌いな	-0.24	0.89
美しい－汚い	-0.26	0.87	美しい－汚い	-0.32	0.75
好きな－嫌いな	-0.20	0.80	快適な－不快な	-0.34	0.72
暖かい－涼しい	-0.53	0.08	暖かい－涼しい	-0.21	0.17
寄与率	52.52	21.85	寄与率	45.01	20.20
累積寄与率	52.52	74.37	累積寄与率	45.01	65.21

(b) 色彩印象に対する観察対象物の赤色面積の影響

各照明下における各評価形容詞対の主観評価値（被験者全平均値）を表 7-18 に示し、標準偏差を表 7-19 に示す。図 7-22 は各照明下の主観評価プロフィールであり、縦軸の評価形容詞対は本項 (b) 因子分析で抽出された因子ごとに並べたものであり、横軸は主観評価値である（被験者全平均値）。

図 7-22 に示すように、評価プロフィールは観察対象物の赤色面積率によって異なってい

た。赤色面積率の違いによる主観評価プロファイルの違いは、特に LED-RGB700 lx 下の“色の質の因子”において顕著である。その他の照明条件においても“色の質の因子”は赤色面積率によって評価が異なっている。

表 7-18 各照明下の主観評価値（被験者全平均値）

因子名		“色の質”							“好ましさ”			その他
評価形容詞対		派手な/ 地味な	動的な/ 静的な	鮮やかな/ くすんだ	活気のある/ 活気のない	澄んだ/ 濁った	明るい/ 暗い	軽い/ 重い	快適な/ 不快な	美しい/ 汚い	好きな/ 嫌いな	暖かい/ 涼しい
BY700	「原図」	0.28	-0.17	0.26	-0.09	0.41	0.46	0.48	0.35	0.41	0.26	-0.50
BY700	0.4%	-0.69	-0.61	-0.87	-0.56	-0.65	-0.41	-0.22	-0.02	-0.31	-0.15	-0.61
BY700	2.4%	-0.96	-0.76	-0.98	-0.80	-0.87	-0.70	-0.37	-0.26	-0.41	-0.22	-0.65
BY700	5.6%	-0.93	-0.81	-1.00	-0.85	-0.91	-0.85	-0.48	-0.30	-0.54	-0.43	-0.76
BY700	14.0%	-1.04	-0.85	-1.13	-0.83	-0.96	-0.93	-0.57	-0.31	-0.56	-0.41	-0.70
RGB700	「原図」	-0.11	-0.07	0.00	0.19	0.28	0.54	0.39	0.09	0.09	0.00	-0.09
RGB700	0.4%	1.02	0.59	1.17	0.76	0.93	1.09	0.67	0.07	0.28	0.28	0.28
RGB700	2.4%	1.46	1.02	1.57	1.24	1.24	1.17	0.81	0.13	0.30	0.31	0.15
RGB700	5.6%	1.91	1.78	2.11	1.85	1.87	1.57	1.37	0.46	0.54	0.22	0.17
RGB700	14.0%	2.44	2.28	2.52	2.24	2.07	2.09	1.59	0.13	0.33	0.31	0.37
BY10	「原図」	-2.07	-1.91	-2.04	-1.98	-2.00	-2.48	-1.96	-0.94	-1.20	-0.98	-1.37
BY10	0.4%	-2.17	-1.94	-2.15	-2.04	-2.02	-2.44	-1.96	-1.00	-1.30	-1.07	-1.26
BY10	2.4%	-2.31	-1.98	-2.30	-2.13	-2.20	-2.59	-2.04	-1.13	-1.35	-1.09	-1.02
BY10	5.6%	-2.59	-2.26	-2.52	-2.20	-2.39	-2.69	-2.22	-1.46	-1.43	-1.26	-1.35
BY10	14.0%	-2.85	-2.56	-2.81	-2.48	-2.78	-2.81	-2.30	-1.54	-1.59	-1.44	-1.33
RGB10	「原図」	-2.06	-1.96	-2.13	-1.72	-2.04	-2.17	-1.85	-0.89	-1.06	-0.70	-1.11
RGB10	0.4%	-1.35	-1.31	-1.43	-1.39	-1.46	-1.65	-1.41	-0.80	-0.98	-0.80	-0.72
RGB10	2.4%	-1.11	-1.09	-1.15	-1.24	-1.15	-1.57	-1.15	-0.74	-0.80	-0.59	-0.65
RGB10	5.6%	-1.00	-1.00	-1.04	-1.15	-1.04	-1.41	-1.11	-0.48	-0.70	-0.56	-0.52
RGB10	14.0%	-0.78	-0.74	-0.72	-0.74	-0.81	-1.30	-1.02	-0.22	-0.41	-0.35	-0.43

表 7-19 各照明下の主観評価値に対する標準偏差

因子名		“色の質”							“好ましさ”			その他
評価形容詞対		派手な/ 地味な	動的な/ 静的な	鮮やかな/ くすんだ	活気のある/ 活気のない	澄んだ/ 濁った	明るい/ 暗い	軽い/ 重い	快適な/ 不快な	美しい/ 汚い	好きな/ 嫌いな	暖かい/ 涼しい
BY700	「原図」	0.59	0.63	0.63	0.59	0.59	0.51	0.51	0.43	0.59	0.63	0.49
BY700	0.4%	0.39	0.46	0.26	0.41	0.45	0.39	0.34	0.49	0.48	0.50	0.46
BY700	2.4%	0.16	0.36	0.18	0.36	0.33	0.34	0.43	0.47	0.58	0.49	0.50
BY700	5.6%	0.22	0.31	0.16	0.29	0.28	0.21	0.60	0.51	0.50	0.60	0.44
BY700	14.0%	0.23	0.33	0.35	0.40	0.30	0.18	0.50	0.48	0.52	0.63	0.36
RGB700	「原図」	0.62	0.42	0.54	0.47	0.50	0.44	0.63	0.47	0.65	0.70	0.61
RGB700	0.4%	0.39	0.39	0.38	0.39	0.29	0.44	0.43	0.54	0.79	0.73	0.72
RGB700	2.4%	0.49	0.42	0.59	0.39	0.42	0.37	0.46	0.83	0.85	0.97	0.93
RGB700	5.6%	0.56	0.43	0.49	0.33	0.41	0.44	0.50	0.86	0.78	1.02	0.69
RGB700	14.0%	0.38	0.38	0.47	0.36	0.39	0.53	0.42	1.31	1.27	1.30	1.09
BY10	「原図」	0.48	0.39	0.39	0.50	0.44	0.38	0.44	0.74	0.63	0.71	0.73
BY10	0.4%	0.43	0.66	0.35	0.52	0.43	0.44	0.53	0.68	0.60	0.52	0.87
BY10	2.4%	0.27	0.27	0.30	0.43	0.23	0.35	0.51	0.67	0.43	0.75	0.82
BY10	5.6%	0.22	0.44	0.29	0.31	0.38	0.29	0.46	0.60	0.61	0.58	0.84
BY10	14.0%	0.31	0.38	0.23	0.37	0.26	0.31	0.44	0.65	0.58	0.80	0.97
RGB10	「原図」	0.33	0.23	0.26	0.38	0.34	0.24	0.40	0.58	0.50	0.87	0.97
RGB10	0.4%	0.45	0.54	0.51	0.59	0.44	0.45	0.48	0.49	0.55	0.69	0.84
RGB10	2.4%	0.30	0.52	0.26	0.41	0.31	0.52	0.37	0.61	0.47	0.77	1.05
RGB10	5.6%	0.23	0.30	0.25	0.37	0.25	0.47	0.41	0.49	0.57	0.67	0.86
RGB10	14.0%	0.36	0.37	0.45	0.52	0.23	0.38	0.50	0.46	0.39	0.54	0.77

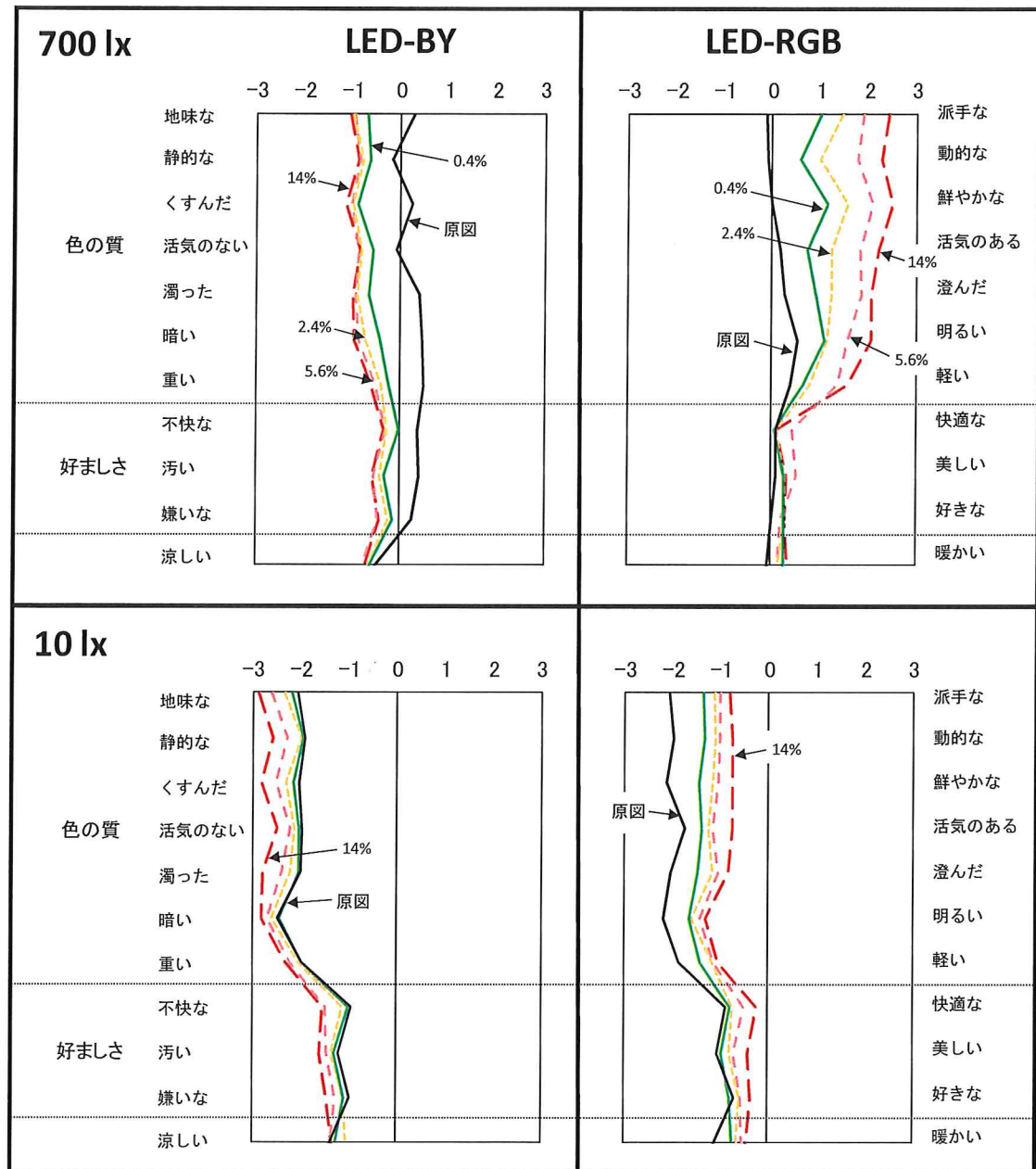


図 7-22 観察対象物の赤色面積率の違いによる主観評価プロフィール

上段：700 lx、下段：10 lx 左：LED-BY、右：LED-RGB

(c) 各因子に対する観察対象物の赤色面積の影響

主観評価値に対する赤色面積の影響をより詳細に解析するために、“色の質の因子”、“好ましさの因子”に対する赤色面積の影響を検討した。各因子を代表する評価形容詞対は“色の質の因子”「派手な－地味な」、「好ましさの因子」「快適な－不快な」とした。

図 7-23 は各因子を代表する評価形容詞対に対する主観評価値と紅葉画像の赤色面積率(%)の関係である。図 7-23 から明らかなように主観評価値に対する赤色面積率の影響は因子によって異なっている。

“色の質の因子”は、LED・RGB、LED・BY 間で赤色面積率に対する主観評価値の傾向が異なっていた。LED・RGB の場合、赤色面積率の増加に伴って主観評価値が増加し、LED・BY では主観評価値が減少している。

“好ましさの因子”の評価は、700 lx の場合、面積率や光源の違いによる変化が僅かであった。10 lx の場合、LED・RGB は赤色面積率の増加に伴って主観評価値が増加し、LED・BY は減少していた。この傾向は“色の質の因子”と同様であるが、“色の質の因子”と“好ましさの因子”の主観評価値にはおおよそ1段階の開きがある。この傾向は各因子のその他の評価形容詞対でも同様であった。以上の結果から、“色の質の因子”は“好ましさの因子”よりも赤色面積率の影響を受けやすいといえる。

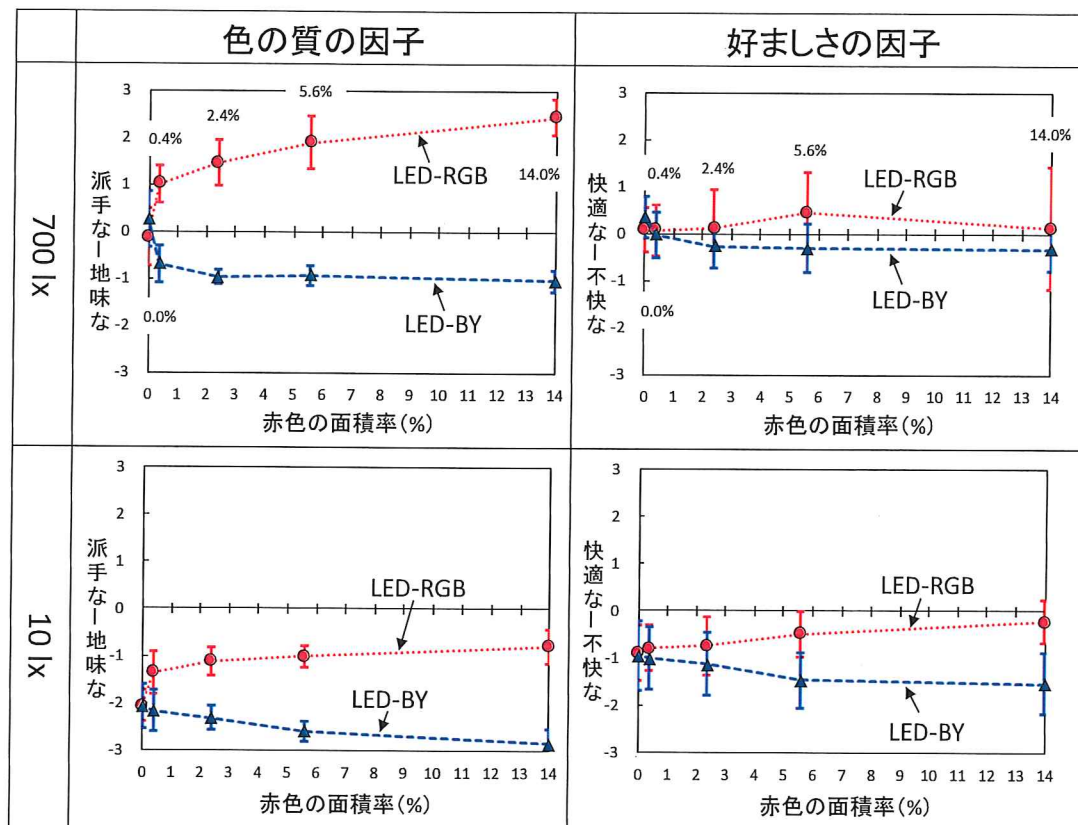


図 7-23 各因子を代表する形容詞対の主観評価値と観察対象物の赤色面積率の関係

上段：700 lx、下段：10 lx 縦軸：主観評価値、横軸：赤色面積率 (%)

(d) 各因子に対する観察対象物の赤色以外の面積の影響

本節では赤色面積が“色の質の因子”に影響することを明らかにし、観察対象物に含まれる色の面積の重要性を示した。赤色以外の色相の面積についても同様のことがいえるかは明らかではない。

第 7.2 節の実験では、「原図」すなわち紅葉画像の面積 0%と、8 色相（赤色、黄みの赤色、赤みの黄色、黄色、緑色、青色、青みの紫色、赤みの紫色）の面積 14%の色彩印象を評価した。本節ではその実験データを用いて、赤色以外の色相の面積の影響についてさらに検討した。

図 7-24 は、各色の紅葉画像の面積率と“色の質の因子”を表す評価形容詞対の主観評価値の関係である。赤色以外の色相の 0%～14%までの曲線は赤色の面積率の結果から推定したものがある。図 7-24 に示すように“色の質の因子”の主観評価値は 700 lx で黄色、青色の

面積率によって変化しないが、赤色、黄みの赤色、赤みの黄色、青みの紫色、赤みの紫色、緑色の場合は面積率によって変化し、主観評価値の変化の大きさは赤色を最大にし、色相がずれるに従って小さくなる。この傾向は 10 lx でも同様であった。

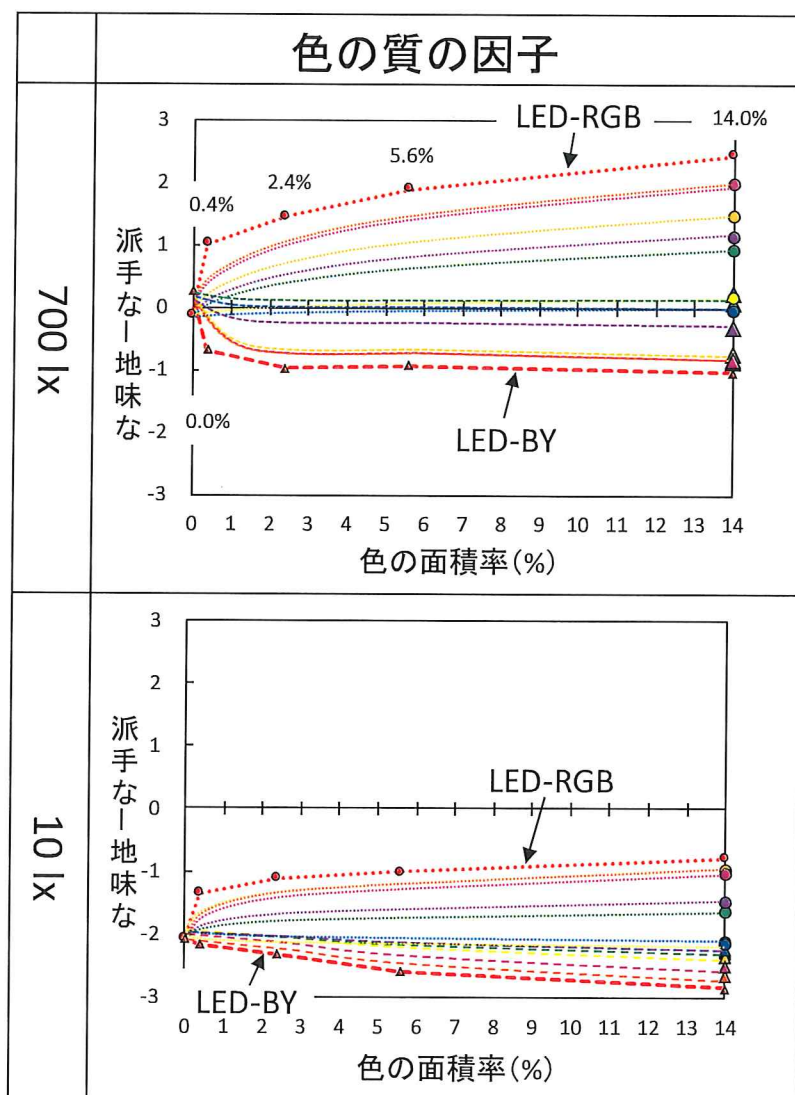


図 7-24 “色の質の因子”を表す主観評価値と観察対象物の色の面積率の関係

上段：700 lx、下段：10 lx

縦軸：主観評価値、横軸：色の面積率（%）

7.4.4 結論

本節の結論を以下に示す。

- (1) 異なる照明下の“色の質の因子” すなわち「色質」は、観察対象物に含まれる色の面積率によって異なり、特に赤色系の色相の面積率が増加することによって「色質」が変化する。
- (2) 演色性の違いを「色質」で評価する場合、ある程度（14%以上）の赤色面積率を持つ観察対象物を用いることが必要である。

7.6 結論

本章で得られた結論を以下に示す。

1. 第6章で示した異なる照明下での色彩印象は“色の質の因子”で評価できるという結論は観察対象物を変化させた場合であっても適用でき、“色の質の因子”は「色質」で表現できることを確認した。
2. 被験者は「色質」を評価するとき、特定の色相の色の見えに注目し、評価の物差しにしていた。
3. 「色質」は観察対象物に含まれる色相によって異なり、評価に対する影響度が最も大きいのは赤色である。黄色や青色は影響がない。
4. 「色質」は、観察対象物に赤色が含まれるか否かによって大きく変化した。
5. 多色配色の色彩印象を評価するときに「注目する色」は、照明条件に関係なく赤色である。
6. 「色質」は観察対象物に含まれる色の面積率によって異なり、特に赤色系の色相の面積率が増加することによって変化する。

7. 演色性の違いを「色質」で評価する場合、ある程度（14%以上）の赤色面積率を持つ観察対象物を用いることが必要である。
8. 「色質」は、観察対象物に含まれる注目色に対する参照光源とテスト光源間のカラフルネス M の差分（ ΔM ）によって推定できる。

観察対象物に赤色を含むか否か、及び赤色の面積によって「色質」が大きく異なるということは、逆に赤色を全く含まない場合や赤色の面積が小さい場合は、演色性の違いを効果的に表すことができないことを意味している。演色性の違いを「色質」であらわす場合、観察対象物に赤色を含むこと、及びある程度大きな面積（14%以上）が必要である。

第8章

照度効果を取り入れた新しい演色性評価方法の開発

第8章 照度効果を取り入れた新しい演色性評価方法の開発

8.1 はじめに

第4章から第7章において分光分布及び照度を変化させた照明下で有彩色物体に対する色の見えの評価を行い、次の結果を得た。

- ① 異なる照明下での色の見えは Ra 、 Ri では評価できない。
- ② 異なる照明下での色彩印象は“鮮やかさ”、“明るさ”に関係する“色の質の因子”で定量的に評価でき、この“高照度から低照度に設定される美術館照明下の作品鑑賞の視点において、知覚的な鮮やかさ、明るさに基づく色の見えの印象が最低限補償されることによって生じる満足感（色の全体印象、色の豊富さ）に対応する尺度”を「色質」と定義した。
- ③ 「色質」は観察対象物に含まれる色相及び色の面積の影響を受ける。特に赤色系、緑色系の色は「色質」に影響を与えるが、黄色系や青色系の色は「色質」に影響を与えない。
- ④ 多色配色の色彩印象を評価するときに「注目する色」は、照明条件に関係なく赤色である。
- ⑤ 「色質」は、観察対象物に含まれる注目色に対する参照光源とテスト光源間のカラフルネス M の差分 (ΔM) によって推定できる
- ⑥ 演色性の違いを「色質」であらわす場合、観察対象物にある程度大きな面積（14%以上）の赤色を含む必要がある。

本章では、上記の第4章から第7章までの実験結果に基づいて、分光分布及び照度が異なる照明下での「色質」を評価できる美術館照明用の新しい演色性評価方法を確立するために「色質評価数」を検討した。

8.2 色質評価数 R_{xi} 、 G_x

個々の試験色に対する色質評価数を“ R_{xi} ”、試験色全体から受ける色質評価数を“ G_x ”とし、以下の方法で定義する。

8.2.1 カラフルネス値の計算

色質評価数はカラフルネスに基づいて算出する。カラフルネスの計算は色の見えモデル CIECAM02^{8・1)} によって得られる a_M 値（赤色－緑色成分）、 b_M 値（黄色－青色成分）を用いた。

CIECAM02 出力値を得るには照明環境（対象物に対する周囲など）のパラメータが必要である。本章では美術館展示室を対象としているため対象物の周囲は平均的な輝度^{8・2)}とし、 F 、 c 、 N_c の値を決定した（ $F=1.00$ 、 $c=0.69$ 、 $N_c=1.00$ ）。また CIECAM02 では視覚系が順応する照明レベルについて順応輝度 L_A (cd/m²) を入力する。一般的に順応輝度は照明環境にある基準白色の輝度の 20 %であることから、計算照度は (8・1) 式によって輝度に変換した値とした。

$$L_A(\text{cd/m}^2) = 0.2 \times E \div \pi \text{-----} (8\cdot1)$$

8.2.2 試験色

色質評価数を算出するには試験色が必要である。色質評価数の試験色の必要条件を下記のように整理した。

- ①色相環を万遍なくカバーしていること。
- ②「色質」に対する光源間の差が明確になるよう、高彩度の赤色を含むこと。
- ③ 実物（色票）で実際に色の見え方を確認できること。

第5章にも示したが、美術作品の多くは複雑な多色配色からなり、ある光源で照明されたときの美術作品全体から受ける色の印象は、対比や同化などといった視覚要素が複雑に影響し合っていると推測できる。演色を考慮して美術館照明を最終的に選択する場合、実物の美術作品を用いて実際の色の見えを確認することが望ましいが、第7章では「色質」が観察対象物の種類（色票、絵）及び用いられた画材の影響を受けないことを確認している。本章では試験色としてより客観性を持たせるために、第6章及び第7章で用いた観察対象物ではなく、上記条件①～③を満たす高彩度 20 色を選定した。図 8・1 に 20 色のイメージ、表 8・1 に 20 色のマンセル値、図 8・2 に分光反射率を示す（CM・700d を用いて各色票を 3 点測定した平均値、波長：360・740 nm、波長間隔：10 nm、測定径：Φ8 mm）。なお、CM・700d によって得られる分光反射率は 10 nm 間隔であるため、測色計算には 5 nm に線形補間した

400-700 nm の値を用いた。表 8-2 に FL-EDL700 lx 下の 20 色の色彩特性（ブライトネス Q 値、カラフルネス M 値、カラフルネスに基づく色成分 a_{mbM} 値、色相角 h 値）を示し、図 8-3 に 20 色の a_{mbM} カラフルネス図を示す。



図 8-1 試験色 20 色

表 8-1 試験色 20 色のマンセル値

No.	H V/C	No.	H V/C
1	5R 4/12	11	5BG 4/6
2	10R 6/12	12	10BG 4/6
3	5YR 7/12	13	5B 4/6
4	10YR 8/12	14	10B 4/8
5	5Y 8/10	15	5PB 4/10
6	10Y 8/10	16	10PB 4/8
7	5GY 7/10	17	5P 4/6
8	10GY 5/8	18	10P 4/6
9	5G 4/6	19	5RP 4/6
10	10G 4/6	20	10RP 4/8

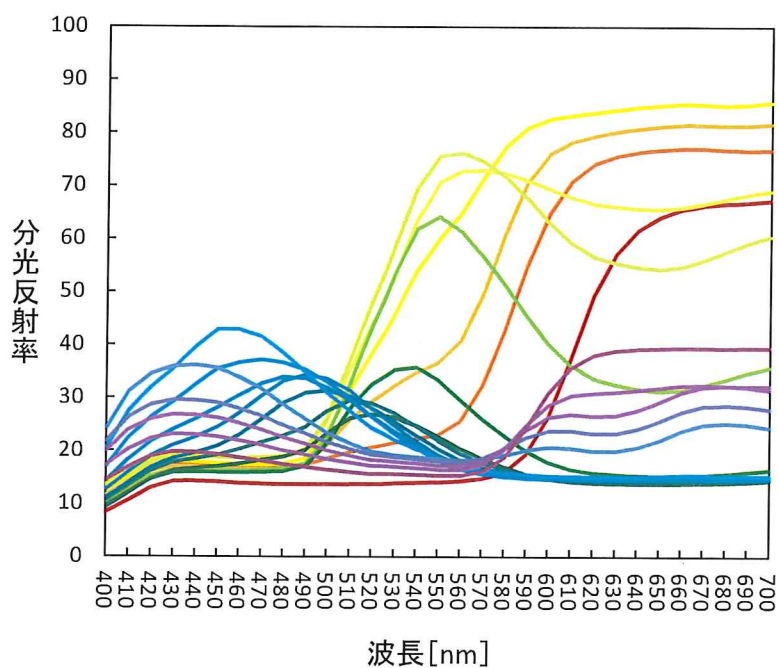


図 8-2 試験色 20 色の分光反射率

(各色票 3 点測定の平均値)

表 8-2 20 色の色彩特性 (CIECAM02 : Q 、 M 、 a_M 、 b_M 、 h 、FL-EDL700 lx で算出)

No.	Q	M	a_M	b_M	h
1	137	43	40	15	21
2	160	46	37	26	36
3	170	42	25	34	53
4	180	42	13	40	72
5	178	38	0	38	90
6	177	40	-9	39	103
7	164	40	-20	34	121
8	137	28	-24	15	147
9	128	19	-18	5	164
10	129	19	-19	1	178
11	128	19	-18	-5	195
12	128	20	-17	-11	214
13	128	21	-14	-16	228
14	128	25	-12	-22	242
15	129	29	-8	-27	254
16	131	19	7	-18	293
17	132	14	12	-7	329
18	133	17	16	-3	351
19	134	20	20	2	7
20	135	28	27	7	15

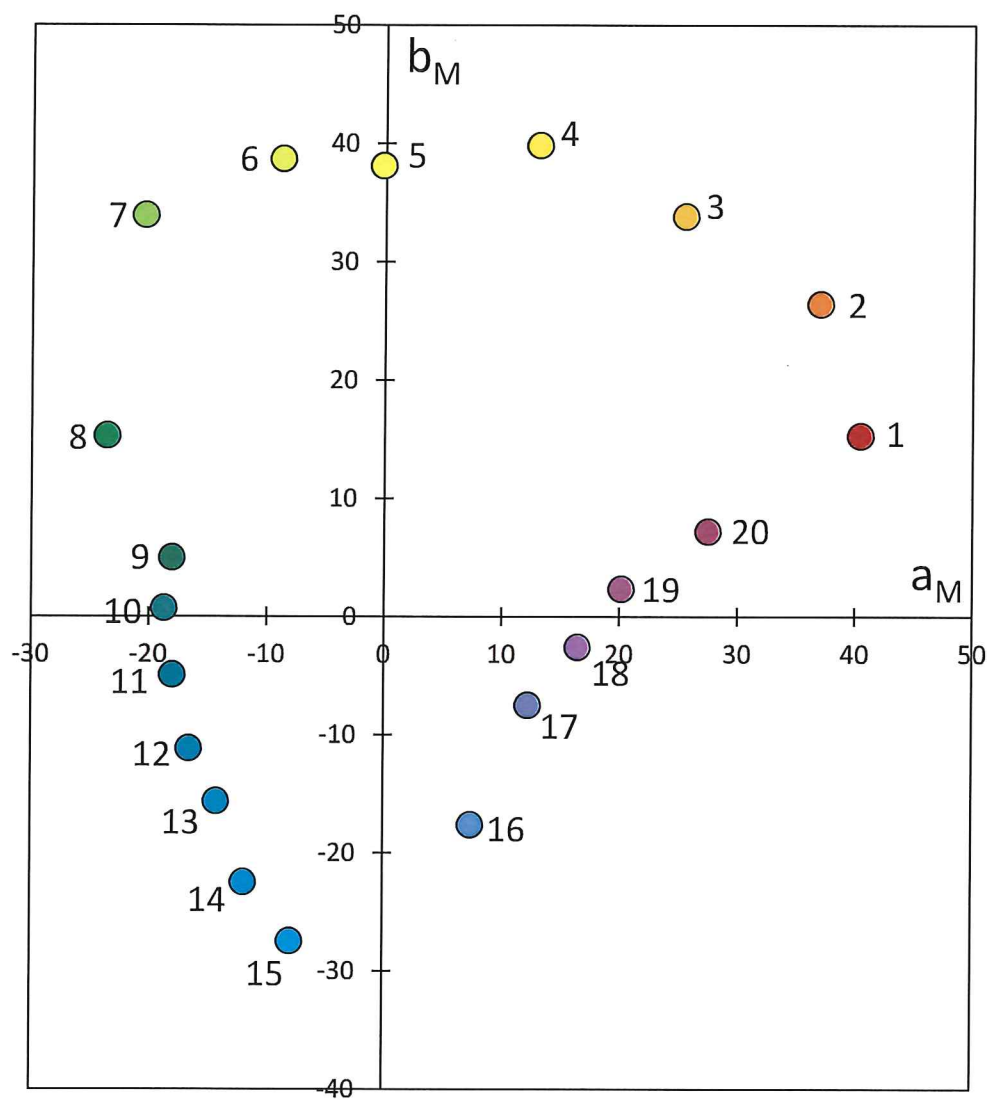


図 8-3 試験色 20 色の a_{MB} 値
(FL-EDL700 lx で算出)

8.2.3 基準光源

基準光源は Ra 96、3060 K の美術館用蛍光灯 FL-EDL（パナソニック社製 FL20S・L-EDL・NU）とし、照度は 700 lx とした。

8.3 個々の試験色に対する色質評価数（ R_{xi} ）

第 7.2 節では「色質」が観察対象物に含まれる色相によって変化することを明らかにした。すなわち「色質」は色相によって異なることから、個々の試験色の「色質」に対応する色質評価数（ R_{xi} ）を考えた。

第 7.2.3 項で示したように、「色質」は観察対象物に含まれる注目色のカラフルネス差 ΔM と高い相関があることから、 R_{xi} は ΔM に基づき式 (8-2) より算出する。ここで $M_{iT(E)}$ は試験色 i 、テスト光源照度 E lx 下の M 値であり、 $M_{iR(E)}$ は試験色 i 、FL-EDL700 lx 下の M 値である。 R_{xi} が 100 は基準光源 FL-EDL700lx と同じ「色質」と定義しているため、 R_{xi} が 100 以上のときは FL-EDL700lx よりも高い「色質」をもち、100 以下の場合には「色質」が低いことを示す。なお R_{xi} は分光分布によっては負値となる場合もあるが意味付けが困難であるため、最小値を“0”とした。

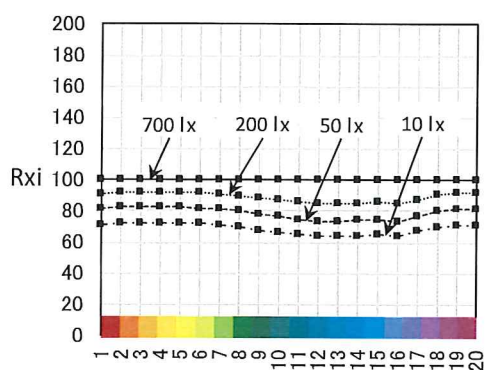
$$R_{xi} = 100 + 100 \times \left(\frac{M_{iT(E)} - M_{iR(E)}}{M_{iR(E)}} \right) \quad (i=1 \sim 20) \quad (8-2)$$

表 8-3 は、(8-2) 式から第 5 章、第 6 章及び第 7 章の実験で用いたテスト光源 FL-EDL、LED-BY、LED-WW、LED-RGB について 700、200、50、10lx 下での R_{xi} を求めたものである。図 8-4 は表 8-3 に基づいて作成した図であり、照度が低下することによってすべての光源で R_{xi} が低下することが示されている。また R_{xi} は光源によってその傾向が異なり、赤色系、緑色系の色相では LED-BY、FL-WW の R_{xi} 値が 100 よりも低くなるのに対し、LED-RGB では高くなる。青色系、黄色系の色相では、LED-BY、FL-WW の R_{xi} 値が 100 よりも高くなるのに対し、LED-RGB では若干低くなるが、赤色系、緑色系の色相に対する差よりもその差が僅かである。すなわち黄色、青色の R_{xi} は光源の違いによる変化が小さく、この傾向は主観評価結果の傾向とも対応している。

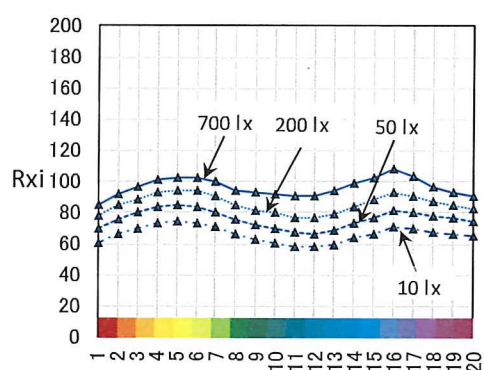
表 8-3 FL-EDL、LED-BY、FL-WW、LED-RGB の R_{xi}

照度 : 700、200、50、10 lx

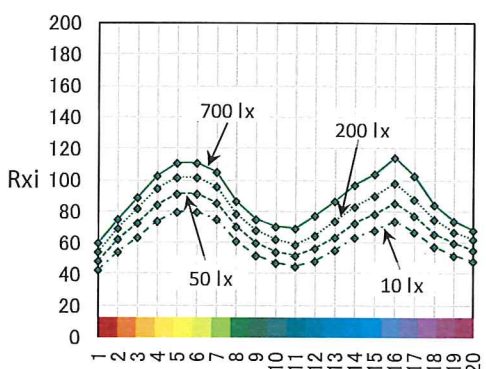
照明条件	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
EDL700	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
EDL200	91	92	92	92	92	92	91	90	88	87	86	85	85	85	86	85	88	90	92	92
EDL50	81	82	83	83	83	82	81	80	78	77	75	74	73	74	75	74	77	81	82	82
EDL10	71	72	73	73	72	72	71	70	68	67	65	64	64	64	65	64	67	70	72	72
BY700	86	92	96	101	103	103	100	95	93	92	91	91	94	99	102	109	104	97	93	91
BY200	78	85	89	93	95	94	91	85	82	80	77	77	79	84	88	93	91	87	85	83
BY50	70	76	80	83	85	84	81	76	72	70	67	67	69	74	77	81	80	78	77	74
BY10	61	66	70	73	74	74	71	66	63	61	59	58	59	64	67	71	70	68	67	65
WW700	60	75	89	103	111	112	105	87	76	71	70	77	87	97	104	114	103	85	74	69
WW200	55	69	82	94	101	102	96	79	68	62	60	65	74	84	90	98	88	75	67	63
WW50	49	62	73	85	91	91	86	70	60	55	52	56	64	73	79	86	77	66	60	56
WW10	43	54	64	74	80	80	75	61	53	48	45	49	55	64	69	75	67	58	52	49
RGB700	152	145	131	110	89	85	101	137	150	152	148	140	131	117	107	81	99	121	138	146
RGB200	138	132	120	102	83	78	92	122	133	135	129	122	113	101	92	67	88	110	126	133
RGB50	123	118	108	91	74	70	82	109	118	119	114	107	99	88	80	58	78	98	113	119
RGB10	108	103	94	80	65	62	72	95	102	104	99	93	86	77	70	50	68	86	98	104



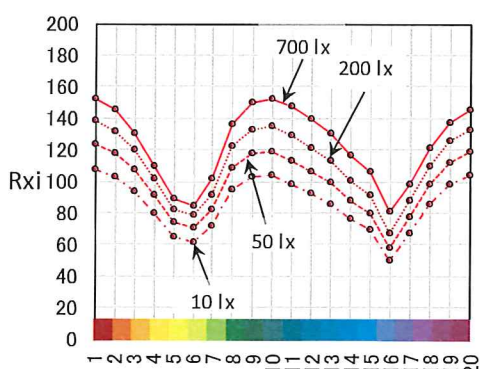
(a) FL-EDL



(b) LED-BY



(c) FL-WW



(d) LED-RGB

図 8-4 各照明下の R_{xi}

照度 : 700、200、50、10 lx

(a) : FL-EDL、 (b) : LED-BY、 (c) : FL-WW、 (d) LED-RGB

8.4 Rxi と主観評価値との関係

Rxi が色質評価数として有効であるかを検証するために、試験色で求めた Rxi と第 7.3 節で示した紅葉画像の色相を変化させた観察対象物に対する「色質」の主観評価結果（「派手な一地味な」に対する 17 人の被験者全平均値）の対応関係を検討した。なお第 7.2 節で用いた観察対象物に付加した紅葉画像 8 色の色相は表 8-4 に示すように本節で選定した試験色 20 色と近似している。紅葉画像 8 色の内、橙色については試験色 No.1 と No.2 の中間の色相角 h ($h=28$) を有するため、橙色の結果を除いた紅葉画像 7 色に対応する試験色を 7 色選び、Rxi ($i=1\sim7$) を計算した。表 8-5 は計算に用いた照明条件である。

図 8-5 は Rxi と「色質」の主観評価結果との関係である。Rxi と「色質」の評価結果は極めて高い相関を示した ($R=0.94$ 、1%有意)。すなわち異なる照明下での個々の色に対する「色質」が Rxi によって評価できることを確認した。

表 8-4 計算に用いた試験色の色相角 h と紅葉画像の色相角 h との対応関係

上段：試験色の色相角 h 、下段：紅葉画像の色相角 h

h : FL-EDL 700 lx で算出

試験色No.	8	5	2	1	19	18	15
色相角 h	147	90	36	21	7	351	254
紅葉画像	緑色	黄色	黄みの赤色	赤色	赤紫色	青紫色	青色
色相角 h	133	95	39	20	355	347	265

表 8-5 計算に用いた照明条件

条件	基準光源		テスト光源		照明条件名
1	700 lx	FL-EDL	700lx	LED-BY	BY700
2				LED-RGB	RGB700
3			10lx	LED-BY	BY10
4				LED-RGB	RGB10

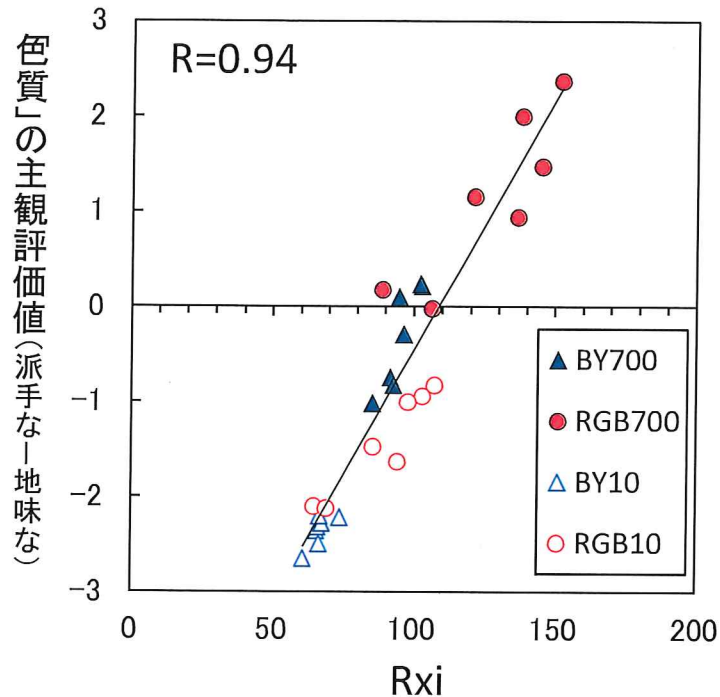


図 8-5 Rxi と「色質」の主観評価結果との関係

主観評価値：「派手な-地味な」に対する被験者全平均値

8.5 試験色全体の色質評価数 (Gx)

第6章において多色配色の「色質」は、照度効果を付加した色域面積に基づく演色評価指数と相関が良いことを確認しており、従って多色配色の観察対象物全体の「色質」は色域面積に基づく演色評価指数で表すことができる。

試験色全体の色質評価数 G_x は (8-3) 式により算出する。ここで $G_{R(E)}$ は基準光源 FL-EDL700 lx 下の試験色 20 色の a_{Mi} から求めた色域面積であり、 $G_{T(E)}$ はテスト光源 E lx 下の a_{Mi} 、 b_{Mi} に色相重み係数 W_{hi} を乗した (8-4) 式、(8-5) 式によって算出する a_{xi} 、 b_{xi} から求めた色域面積である (図 8-6)。

$$G_x = 100 \times \left(\frac{G_{T(E)}}{G_{R(E)}} \right) \quad (8-3)$$

$$a_{xi} = a_{Mi} \times W_{hi} \quad (i=1 \sim 20) \quad (8-4)$$

$$b_{xi} = b_{Mi} \times W_{hi} \quad (i=1 \sim 20) \quad (8-5)$$

$$W_{hi} = \frac{R_{xi}}{100} \quad (i=1 \sim 20) \quad (8-6)$$

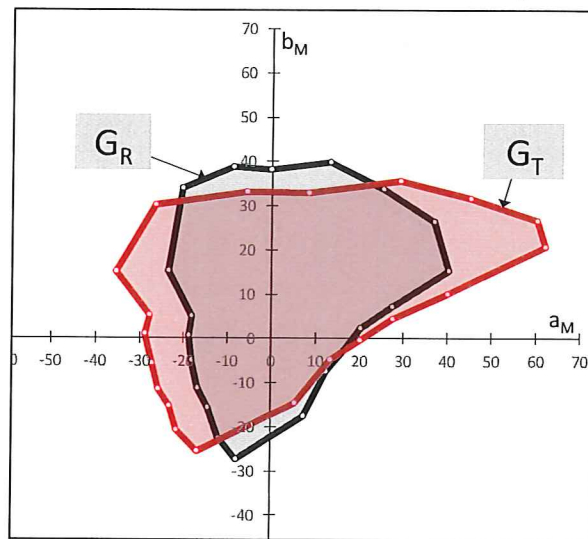


図 8-6 G_R と G_T

G_R : 基準光源の色域面積、 G_T : テスト光源の色域面積

重み係数 W_{hi} は以下の考え方に基づいて定める。多色配色を評価する場合、色相によって主観評価に対する影響度 (8-2)~(8-3) や色の目立ち (8-4)~(8-5) が異なることが既に報告されており、赤色系の色相の影響度が最も高く、黄色や青色については影響しないと述べられている。本研究においても第 7.2 節で「色質」が色相によって異なること、第 7.3 節で多色配色に対する注目色が赤色であることを明らかにしている。以上を整理すると、

有彩色物体群（多色配色）を主観評価するとき、

- ① 赤色系の色相 (黄みの赤色～赤色～紫みの赤色) は、評価に対する影響が最も大きい。
- ② 緑色系の色相は、赤色ほどではないが評価に影響する。
- ③ 黄色系、青色系の色相は、評価に影響しない。

である。

上記の色相の影響を考慮して、 W_{hi} は試験色 No.1～No.3 (赤色から黄みの赤色)、No.9～No.11 (緑色)、No.18～No.20 (紫みの赤色) の色相範囲において (8-6) 式により求める。すなわち W_{hi} はテスト照明下の R_{xi} を基準光源の R_{xi} 値、すなわち 100 で除したものである。それ以外の色相範囲は重みをかけず $W_{hi}=1$ とする。

基準光源と同じ「色質」は $G_x=100$ であり、100 以上は基準光源よりも高い「色質」、100

以下は低い「色質」であることを示す。なお G_x は分光分布によっては負値となる場合もあるが負値となった場合の意味付けが困難であるため、最小値は“0”とした。

表 8-6、図 8-7 は FL-EDL、LED-BY、LED-RGB の各照度 (700 lx、200 lx、50 lx、10 lx) に対する G_x であり、照度の低下とともに G_x は低下する。各照度ともに LED-RGB は他の光源よりも G_x が高い、すなわち LED-RGB の「色質」が高いことを示している。

表 8-6 FL-EDL、LED-BY、FL-WW、LED-RGB の G_x

照度 : 700、200、50、10 lx

照明条件	G_x	照明条件	G_x
EDL700	100	WW700	64
EDL200	75	WW200	49
EDL50	55	WW50	37
EDL10	39	WW10	26
BY700	89	RGB700	171
BY200	67	RGB200	124
BY50	49	RGB50	88
BY10	35	RGB10	60

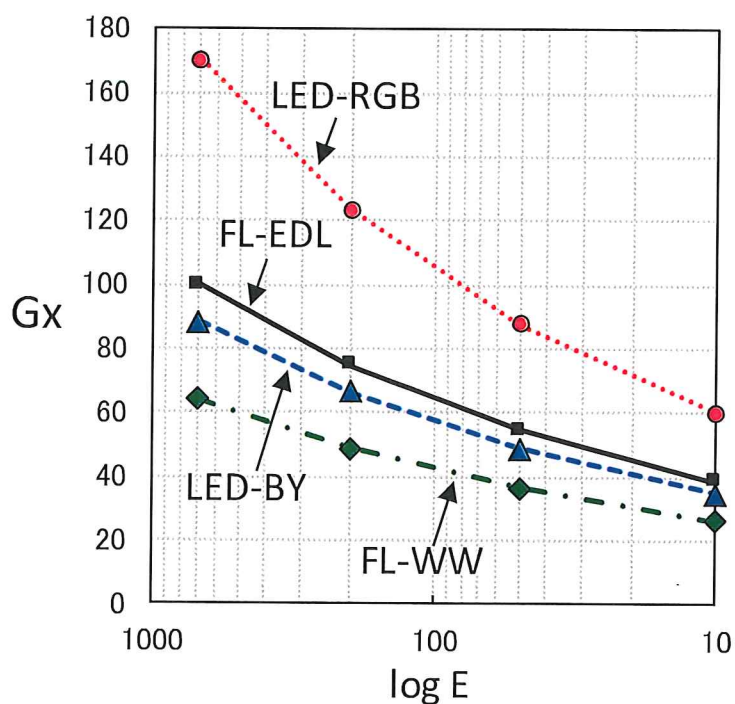


図 8-7 FL-EDL、LED-BY、FL-WW、LED-RGB の G_x と照度の関係

照度 : 700、200、50、10 lx

8.6 Gx と主観評価値との関係

Gx が色質評価数として有効であるか、及び選定した試験色 20 色の有用性を検証するために、試験色 20 色で求めた Gx と第 6 章で示した多色配色 (mosaic) に対する「色質」の主観評価結果（「派手なー地味な」に対する 13 人の被験者全平均値）の対応関係を検討した。表 8-7 は計算に用いた照明条件である。

図 8-8 は Gx と「色質」を代表する「派手なー地味な」の主観評価結果の関係を示したものである。Gx と「色質」の主観評価結果は極めて高い相関を示した ($R=0.97$ 、1%有意)。すなわち異なる照明下での多色配色に対する「色質」が Gx によって評価できることを確認した。

表 8-7 計算に用いた照明条件

条件	基準光源	テスト光源	照明条件名
1	700 lx FL-EDL	FL-EDL	EDL700
2		LED-BY	BY700
3		FL-WW	WW700
4		LED-RGB	RGB700
5		FL-EDL	EDL10
6		LED-BY	BY10
7		FL-WW	WW10
8		LED-RGB	RGB10

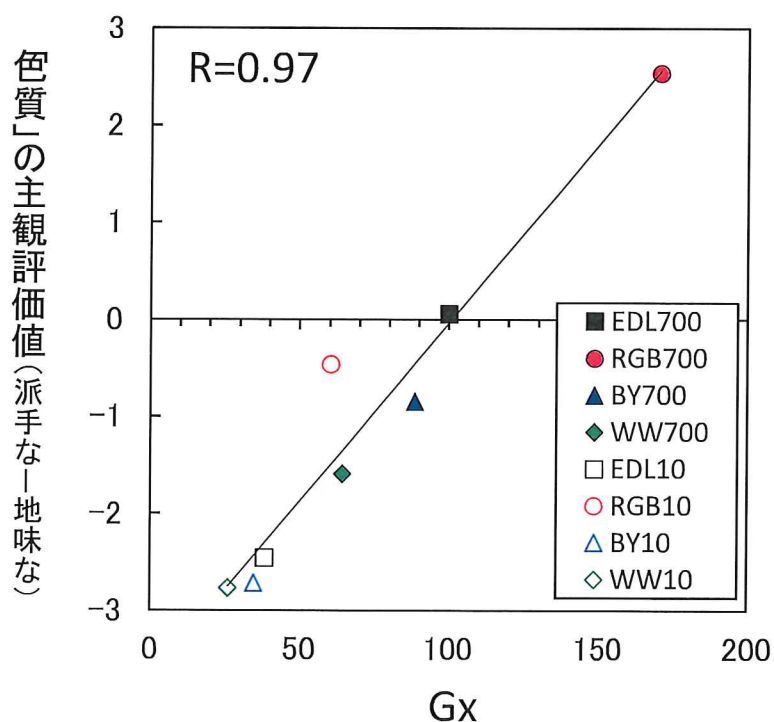


表 8-8 Gx と「色質」の主観評価結果との関係

主観評価値：「派手なー地味な」に対する被験者全平均値

8.8 結論

本章は照度効果を取り入れた新しい演色性評価方法を開発することを目的として、異なる照明下での「色質」の定量化を試みた。

「色質」は第6章で「高照度から低照度に設定される美術館照明下の作品鑑賞の視点において、知覚的な鮮やかさ、明るさに基づく色の見えの印象が最低限補償されることによって生じる満足感（色の全体印象、色の豊富さ）に対応する尺度」と定義した。この定義に基づき「色質」を表現する評価式として、照明された有彩色物体の知覚的な鮮やかさ、明るさと関連させた（1）個々の試験色に対する色質評価数 R_{xi} 、及び（2）試験色全体に対する色質評価数 G_x の二つを提案した。

本章で得られた結論を以下に示す。

1. 異なる照明下での個々の試験色に対する「色質」は、照度、観察対象物の色彩特性（色相、鮮やかさ）を考慮した色質評価数 R_{xi} で表すことができる。
2. 異なる照明下での試験色全体に対する「色質」は、照度、観察対象物の色彩特性（色相、鮮やかさ）、色の注目度を考慮した色質評価数 G_x で表すことができる。
3. 分光分布及び照度の異なる照明下の美術作品の「色質」は、 R_{xi} 及び G_x で評価できることを提案する。

次章において G_x に基づいた美術館用光源の分光分布最適化設計を検討する。

第 9 章

色質評価数 G_x 最適化による分光分布設計

第9章 色質評価数 G_x 最適化による分光分布設計

9.1 はじめに

光源の分光分布を最適化することによって照明視環境は向上するため、最適な色再現及び最適な分光分布に関する研究はこれまでも数多く実施されてきた^{9-1) ~9-11)}。しかし、最適な色再現及び最適な分光分布は用途や目的、たとえば住宅照明や店舗照明などによって異なり、美術館照明を想定した場合は美術館照明にとっての色再現及び分光分布の最適化を図る必要がある。

第 1.2.1 項にも示したように一般的に美術制作は明所視、明るい環境下で行われている。展示室の照度が低く設定されている場合、Hunt 効果によって美術作品の色は暗くくすみ、制作時の照明環境下の色とは異なっていると考えられる。上記の現象を検証するために、本研究では高照度下と低照度下の色の見えの違いと演色性の関係を検討し、第4章から第7章にかけて照度が低下することによって色の見えが変化し、それによって色彩印象も低下すること、色彩印象は演色性の影響を受けることを明らかにした。さらに、従来の美術館照明の指標として用いられている Ra が低照度下の色の見えを適切に評価できないことも確認した。

従来、美術館展示用光源は JIS Z 9112:2012 (蛍光ランプ・LED の光原色及び演色性による区分)⁹⁻¹²⁾ における演色 AAA 規格、すなわち Ra 90 以上 (光色が電球色の場合) の高演色ランプであることが要求され、 Ra の高い光源が“最適な光源”とされてきた。しかし、照度低下によって色の見えが変化し、 Ra が数値通りの色の見えを表していない低照度下において、美術鑑賞にとっての最適な色再現及び最適な分光分布とはどのようなものなのかという疑問が生ずる。

近年、LED ランプの応用分野は急速に広がっており、色の見えを重視する美術館照明にも高演色形の LED ランプが利用され始めている。LED ランプは主波長、半値幅の異なる様々な LED ランプを組み合わせることで比較的自由に光源の分光分布を変化させることができる。わが国では、従来の美術館専用的高演色形蛍光ランプに近い色の見えを与える高演色 LED ランプとして、紫色光励起 LED ランプが注目されている。しかし、そのランプの特徴でもある広帯域分光分布であっても 50 lx 以下の低照度下では美術作品の見えの好ましさを維持することはできないことが明らかになっている⁹⁻⁵⁾。

一方、欧米では分光分布形状とエネルギー効率及び変褪色性能の観点から、赤色・緑色・青色の狭帯域の LED ランプを組み合わせた 3 色 LED ランプや赤色・黄色・緑色・青色の狭帯域の LED ランプを組み合わせた 4 色 LED ランプが「色の見え」、「保存」、「効率」を

ともに満たす高性能ランプとして注目されている 9-1) ~9-4)、9-6) ~9-7)。

美術館照明の最適な分光分布について、Thornton⁹⁻⁹⁾ は明瞭性 (visual clarity) の高い分光分布として人間の眼 (3 錐体) の感度に対応するピーク波長 (prime color) の分光分布を提案しており、この分光分布が美術館のような低照度環境で有用であることを述べている。

Berns^{9-1) ~9-2)} は LED ランプの演色効果を検討し、仮想分光分布のシミュレーション分析を行った。その結果、3 波長を組み合わせた赤・緑・青の 3 原色タイプの白色 LED ランプは分光分布設計によってクロマを増減させることができ、有彩色物体の彩度を強調する演色効果 (以下、色域拡大効果) を活用することによって低照度下で失われた鮮やかさや明瞭性を補正することができると述べている。また、CIE 昼光と等色する仮想の美術館照明用の狭帯域分光分布の白色 LED を設計し、狭帯域分光分布の LED ランプは色の見えが良いだけではなく、放射エネルギーが小さいために損傷指数 DI が小さいことを明らかにしている 9-6)。

色域拡大効果のような効果演色を応用した例では、Viénot ら⁹⁻⁹⁾ による研究がある。Viénot らは、褪色した美術作品を照明する光源の最適な分光分布を検討し、光源によって“褪色したサンプルの色を褪色前のサンプルの色に戻す”ことを色再現の目標に設定し、褪色したサンプルの色の印象が最も良い状態となる LED ランプの分光分布をシミュレーション及び主観評価実験により求めた。その結果、ある特定の 3 波長を組み合わせた LED ランプで照明することによってオリジナルの色に近い見えを与えることができると述べている。

LED ランプの台頭により、従来の R_a のような忠実性色再現の考えだけではなく、効果演色を応用した色再現の考えにも注目が集まっている。

本章では、異なる照明下での「色質」を定量的に評価できる色質評価数を最適化することによって、低照度下の美術鑑賞に対する最適な光源の分光分布が求められると考えた。すなわち、低照度下において G_x が最大となる分光分布を求め、さらに得られた最適な分光分布を実際の LED ランプで再現し、その照明下で色彩印象を評価することによって G_x の予測精度を検証し、低照度下の美術鑑賞に対する最適な光源の分光分布を検討した。

9.2 色質評価数 G_x に基づく分光分布の最適化

G_x に基づいて仮想分光分布をシミュレーション計算し、それらの仮想分光分布に対する色の見えの予測計算を行った。

9.2.1 低照度下の色再現目標

本章では“低照度下においても高照度下と同等の「色質」をもつ分光分布が最適な分光分

布である”とし、 G_x の最大化を照明の色再現目標とした。最適化計算の照度は第3章の実態調査及び第4章から第7章の実験結果をふまえて 10 lx とした。

9.2.2 低照度下で G_x を最大とする分光分布設計

光色は基準光源である美術館博物館用蛍光ランプ (FL-EDL) の 3060 K (電球色) 一定とした。白色光は特定の 2 色以上の単色光を混色することによって得られるため、単色光の主波長を変化させ、2 色混光、3 色混光、4 色混光、5 色混光、6 色混光をそれぞれ作成した。各単色光の主波長の半値幅は、現在生産され、演色評価実験に用いられている LED 製品を参照し 20 nm とした。

(a) 2 色混光

基準光源 (相関色温度 3060 K ± 0.000 Duv) に等色する 2 色混光の分光分布を、黄色～赤色の主波長 (580 nm～610 nm)、青色～青緑色の主波長 (455 nm～499.5 nm) の分光分布を組み合わせで作成した。図 9-1 に各単色の分光分布を示し、その xy 色度を図 9-2 に示す。表 9-1 に示すように 2 色混光の各混光白色光の G_x 値はすべて “0”、すなわち G_x の最低値となった。図 9-3 に組み合わせた混光白色光の分光分布を示す。

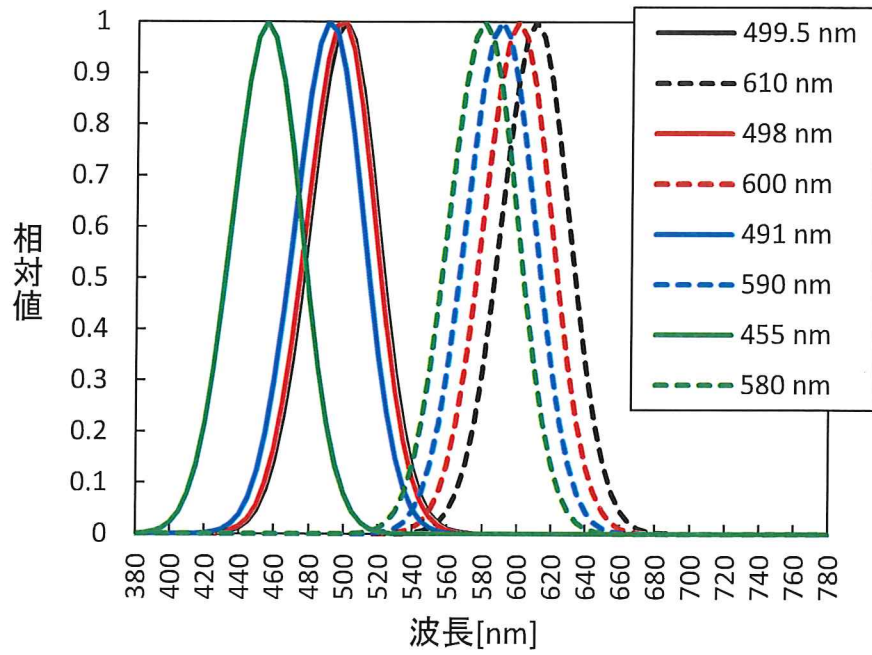


図 9-1 各単色の分光分布

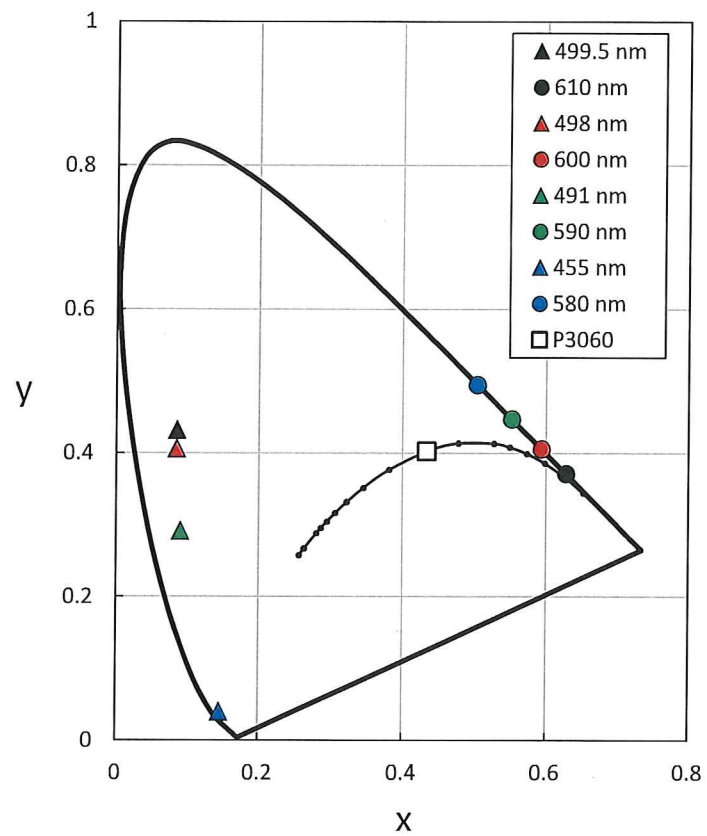


図 9-2 各単色の xy 色度図

表 9-1 各混光白色光に対する G_x と R_a

No.	波長	G_x	R_a
No.1	499.5, 610	0	42
No.2	498, 600	0	52
No.3	491, 590	0	43
No.4	455, 580	0	14

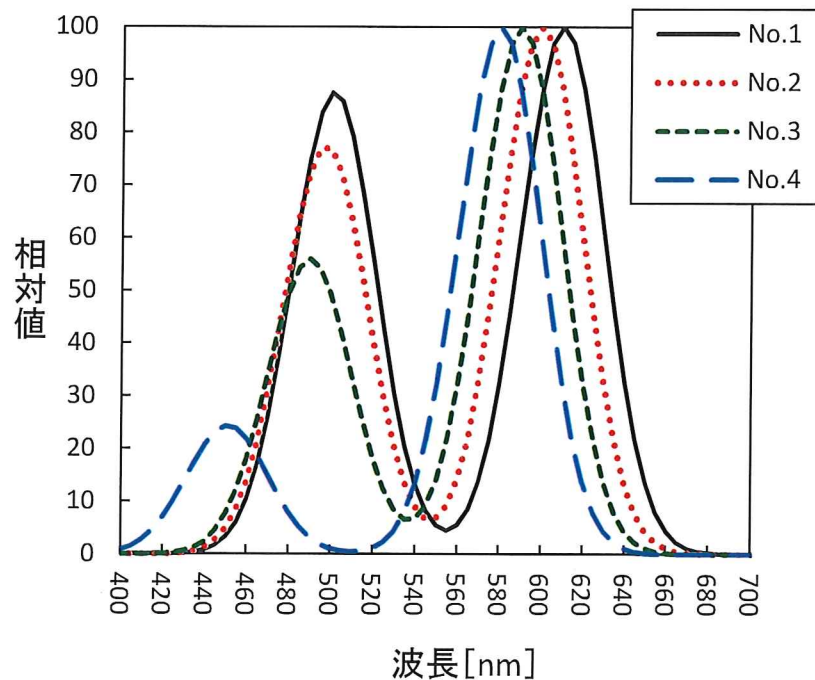


図 9-3 混光白色光の相対分光分布

(b) 3色混光

基準光源（相関色温度 $3060\text{ K} \pm 0.000\text{Duv}$ ）に等色する3色混光の分光分布を、赤色、緑色、青色をベースに3種類の分光分布を組み合わせて作成した。単色光の主波長は赤色（630 nm、650 nm、670 nm）、緑色（530 nm、550 nm、570 nm）、青色（430 nm、450 nm、470 nm）である。

図 9-4 に各単色の分光分布を示し、その xy 色度を図 9-5 に示す。

表 9-2 に示すように混光白色光の G_x 値は、組み合わせた波長によって大きく異なり、最大値は主波長 650 nm、530 nm、450 nm の組み合わせで G_x は 66（No.16）であった。最小値は 610 nm、550 nm、430 nm の組み合わせで G_x は 34（No.31）であった。図 9-6 は、 G_x が最大（ G_x 66）及び最小（ G_x 34）となる混光白色光の分光分布である。

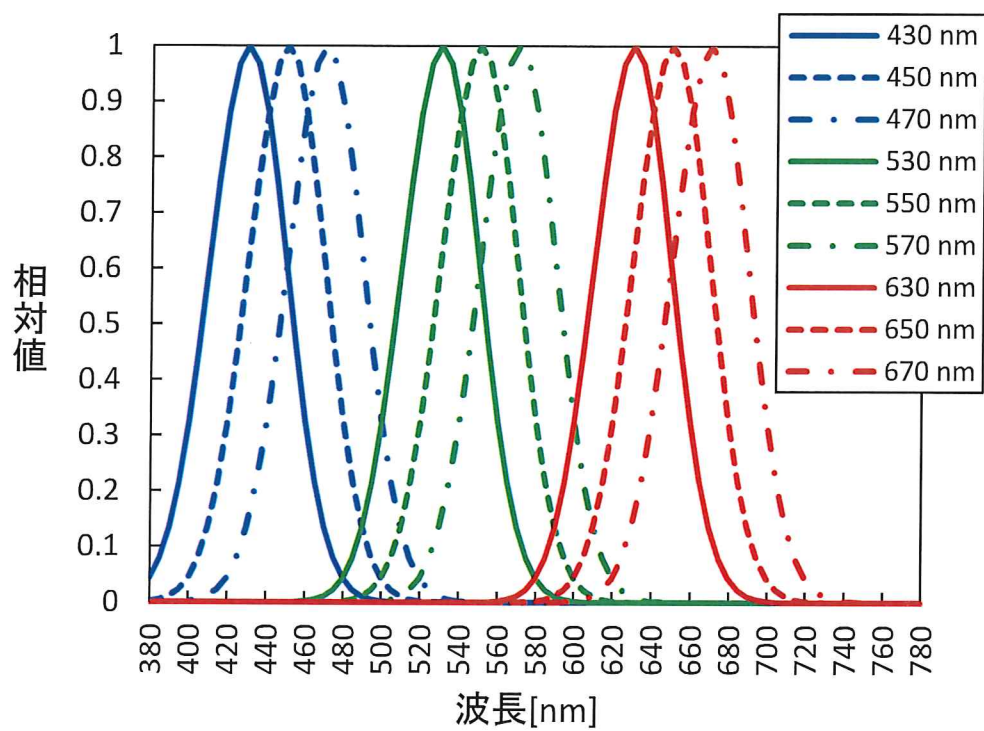


図 9-4 各単色の相対分光分布

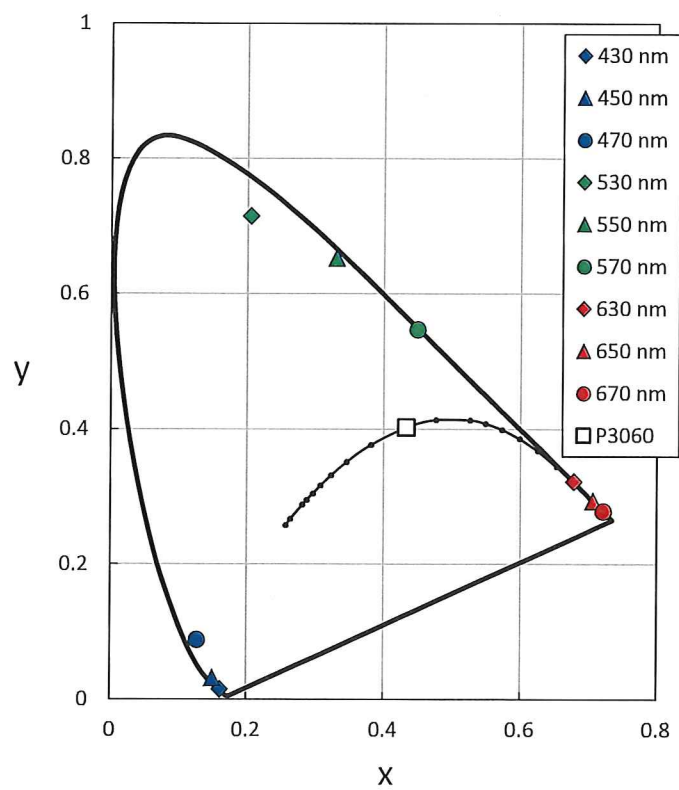


図 9-5 各単色の xy 色度図

表 9-2 各混光白色光に対する G_x と R_a

No.16 : G_x 最大値、No.31 : G_x 最小値

No.	波長	G_x	R_a	No.	波長	G_x	R_a
No.5	470,550,650	53	60	No.19	450,550,610	34	70
No.6	470,550,630	44	85	No.20	450,510,650	53	-16
No.7	470,550,610	33	79	No.21	450,510,630	48	19
No.8	470,510,610	35	55	No.22	450,510,610	36	58
No.9	470,510,630	47	17	No.23	430,510,650	57	-15
No.10	470,510,650	57	-17	No.24	430,510,630	48	19
No.11	470,530,610	38	81	No.25	430,510,610	36	60
No.12	470,530,630	53	48	No.26	430,530,650	57	19
No.13	470,530,650	65	16	No.27	430,530,630	54	51
No.14	450,530,610	39	86	No.28	430,530,610	40	86
No.15	450,530,630	54	51	No.29	430,550,650	52	56
No.16	450,530,650	66	19	No.30	430,550,630	44	75
No.17	450,550,650	53	59	No.31	430,550,610	34	66
No.18	450,550,630	44	80				

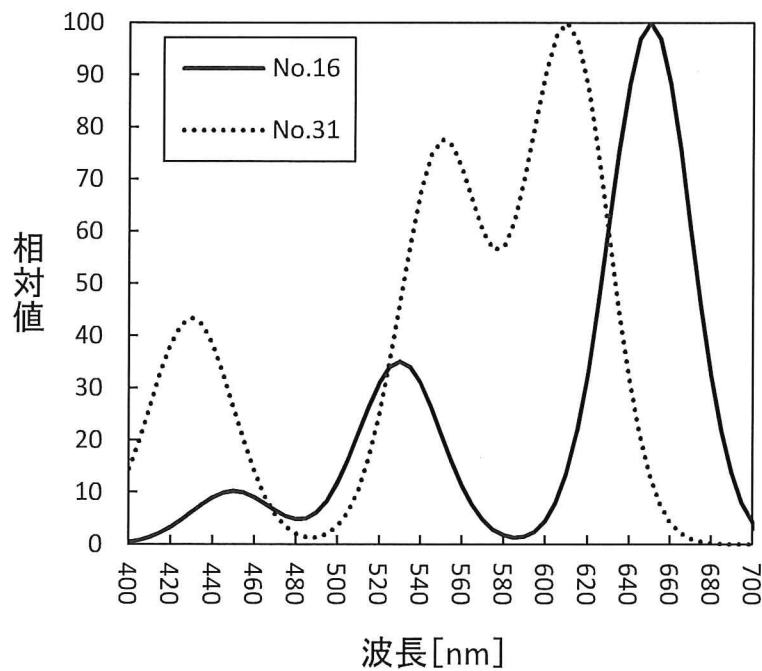


図 9-6 G_x が最大 (G_x 66、No.16) および最小 (G_x 34、No.31) となる混光白色光の相対分光分布

(c) 4色混光、5色混光、6色混光

赤色 (R : 640 nm)、黄色 (Y : 580 nm)、緑色 (G : 530 nm)、青色 (B : 470 nm) をそれぞれ主波長とする単色光に、赤色、黄色、緑色、青色の各主波長の間中間点にオレンジ色 (O : 610 nm)、黄緑色 (YG : 555 nm)、青緑色 (BG : 500 nm) を主波長とする単色光を追加し、計 7 種類をベースに、基準光源 (相関色温度 3060 K ± 0.000 Duv) に等色する 4 ～6 色混光の分光分布を作成した。図 9-7 に各単色の分光分布を示し、その xy 色度を図 9-8 に示す。

表 9-3 は各混光白色光に対する G_x と R_a であり、No. 32～No. 41 は 4 色混光の結果であり、No. 42～No. 51 は 5 色混光の結果であり、No. 52～No. 57 は 6 色混光の結果である。4 色混光、5 色混光、6 色混光の場合も組み合わせた単色光によって G_x 19～ G_x 50 まで変化した。4 色混光の最大値は G_x 50 であり、5 色混光の最大値は G_x 50 であり、6 色混光の最大値は G_x 43 であった。4～6 色混光の最大値は 3 色混光の最大値 (G_x 66) よりも小さく、4 色混光以上の優位性はないといえる。図 9-9 は、各 4～6 色混光で G_x が最大となる混光白色光の分光分布である。

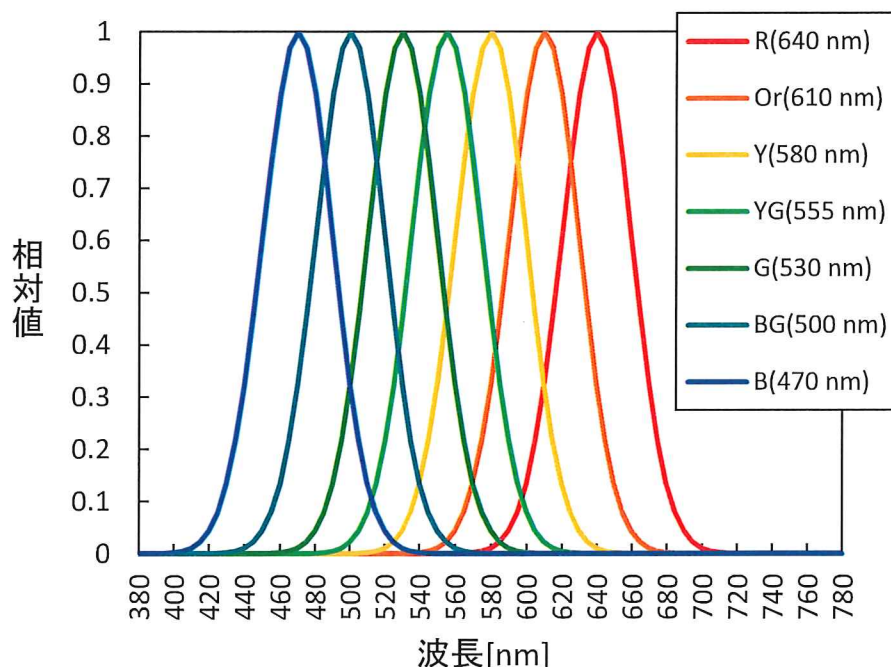


図 9-7 各単色の相対分光分布

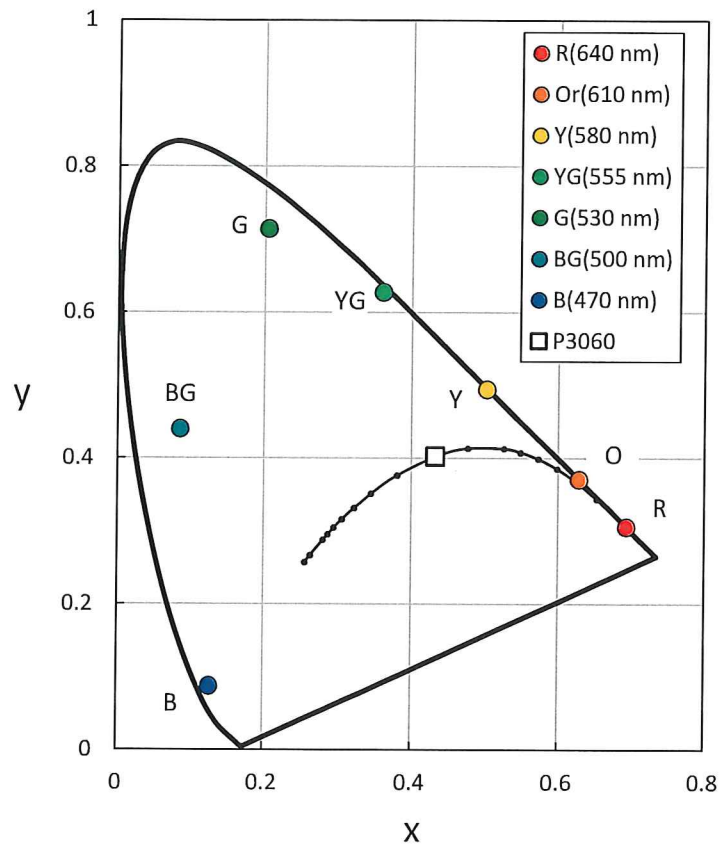


図 9-8 各単色の xy 色度図

表 9-3 各混光白色光に対する G_x と R_a

No.33、No.41、No.46、No.51、No.53：各4色～6色混光で G_x が最大となる組み合わせ

No.	波長	G_x	R_a	No.	波長	G_x	R_a	No.	波長	G_x	R_a
4色混光	No.32	R,Y,G,B	40 94	5色混光	No.42	R,O,Y,G,G,B	40 95	6色混光	No.52	R,Y,Y,G,B,G,B	38 95
	No.33	R,Y,G,G,B	50 70		No.43	O,Y,Y,G,G,B	36 86		No.53	R,O,Y,G,G,B,G,B	43 85
	No.34	O,Y,G,B	28 65		No.44	R,O,Y,Y,G,B	40 85		No.54	R,O,Y,G,B,G,B	36 85
	No.35	R,O,Y,G,B,G	32 44		No.45	O,Y,G,B,G,B	37 75		No.55	R,O,Y,Y,G,B,G,B	30 73
	No.36	R,Y,Y,G,B	19 32		No.46	R,Y,Y,G,G,B	50 65		No.56	R,O,Y,Y,G,G,B	38 97
	No.37	R,O,G,B,G	39 31		No.47	O,Y,Y,G,B,G,B	25 55		No.57	R,O,Y,Y,G,G,B,G	33 58
	No.38	R,O,Y,G,B,G	43 20		No.48	O,Y,G,B,G,B	22 44				
	No.39	R,Y,G,G,B,G	49 15		No.49	R,Y,Y,G,G,B,G	45 25				
	No.40	R,Y,Y,G,B,G	49 9		No.50	R,O,Y,G,B,G	44 16				
	No.41	R,O,G,B,G	50 2		No.51	R,O,Y,G,G,B,G	50 0				

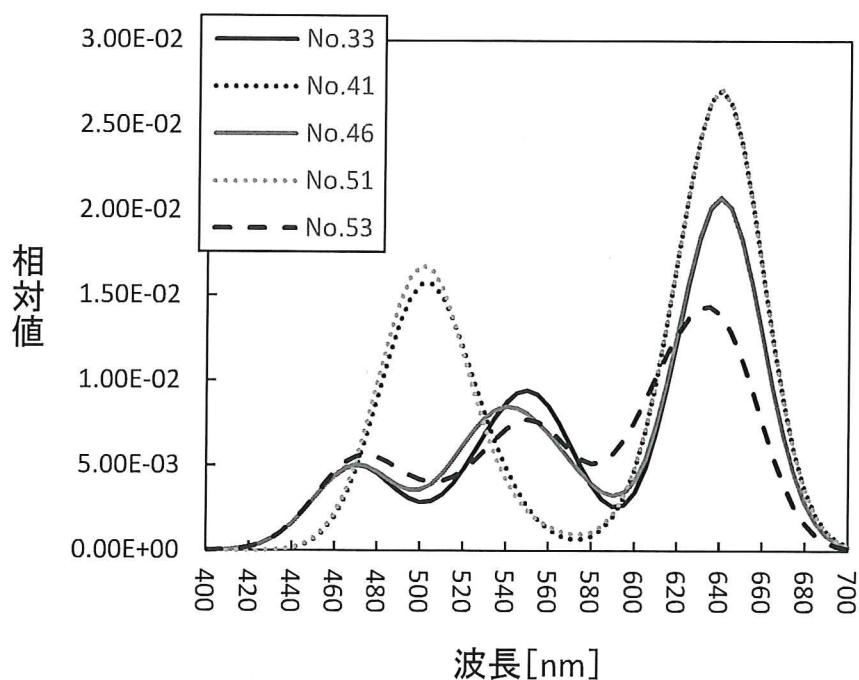


図 9-9 各 4 色～6 色混光で G_x が最大となる組み合わせの分光分布

(d) 結果

2 色混光、3 色混光、4 色混光、5 色混光、6 色混光の仮想分光分布から、10 lx 下で G_x が最大となる組み合わせを検討した結果、 G_x が最大となるのは 650 nm、530 nm、450 nm の単色光を組み合わせた 3 色混光であった (G_x 66)。2 色混光、4 色混光、5 色混光、6 色混光では G_x 最大値が 3 色混光の最大値よりもすべて小さかった。

図 9-10 は本項で求めた白色混光の G_x と R_a の関係であり、 R_a は単色光の混光数が増加するほど高くなる。 R_a 最大値は 6 色混光の R_a 97 であり、この 6 色混光の G_x は 33 である。一方、 G_x 最大値は 3 色混光の G_x 66 であり、この 3 色混光の R_a は 19 である。すなわち R_a と G_x の最適分光分布は大きく異なっている。

以上から、10 lx 下で G_x が最大となる組み合わせは、前述したように 650 nm、530 nm、450 nm の単色光を組み合わせ 3 色混光であることが明らかになった。

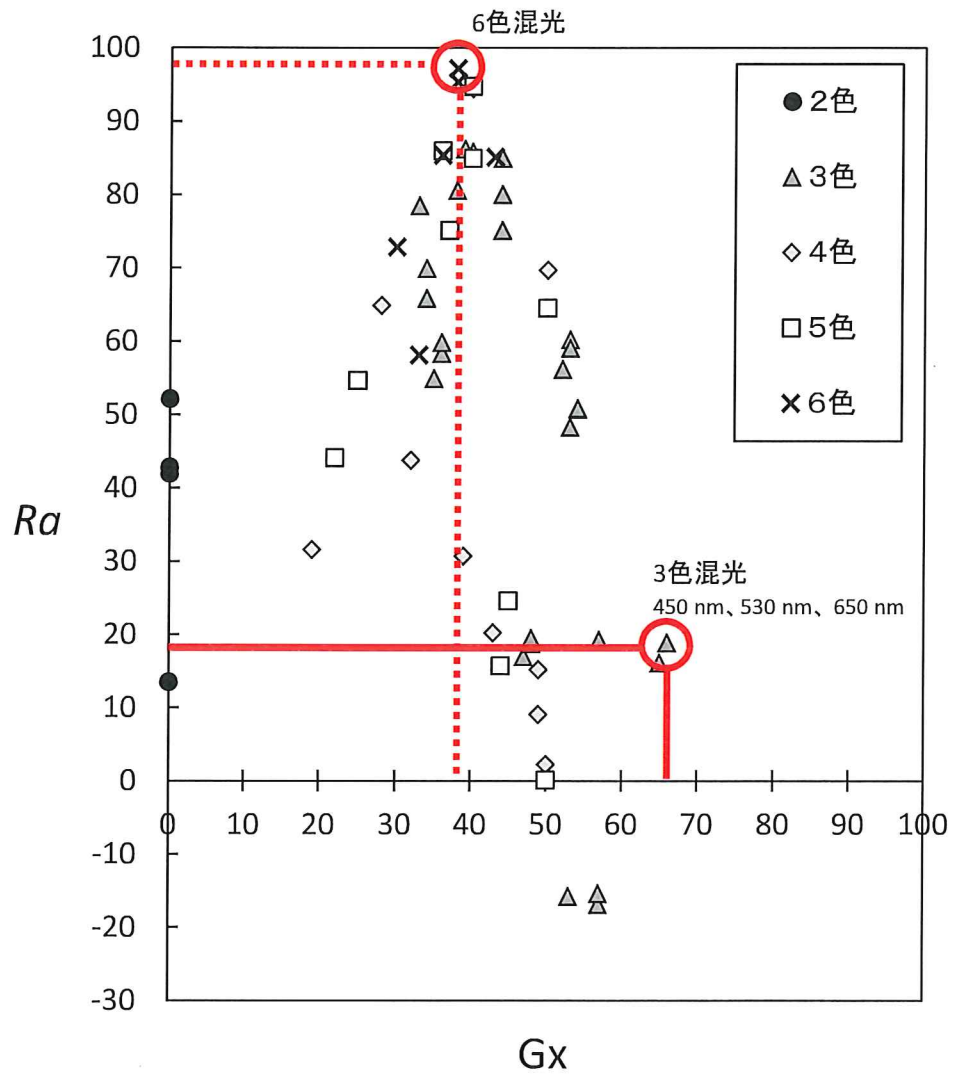


図 9-10 G_x と R_a の関係

9.3 最大 Gx を有する光源下の色彩印象評価

前節で求めた 10 lx 下で最大の Gx を有する 3 色混光の分光分布 (650 nm、530 nm、450 nm) に近似した分光分布を、実際の単色 LED を組み合わせた照明装置により再現し、その照明下での「色質」を主観評価することによって Gx の予測精度を確認し、低照度下の美術鑑賞に対する最適な光源の分光分布を検討した。

9.3.1 実験

(a) 実験方法

実験は両眼隔壁法によって行い、左眼で観察する美術館用蛍光ランプ (パナソニック社製 FL20S・L-EDL・NU) 700 lx 下での観察対象物の色彩印象を基準に、右眼で観察するテスト照明条件下の観察対象物の色彩印象を比較評価した。

被験者は女性 8 名 (18 歳～49 歳) である。4 名は色彩評価に習熟した学生であり、4 名は美術制作、美術教育を学ぶ学生である。眼鏡及びコンタクトレンズの使用制限は特に行わなかったが、日常的に視力矯正している被験者についてはその状態で実験に参加するよう教示した。

(b) 評価観察ブース

実験に用いた評価観察ブースを図 9-11 に示す。評価観察ブース (奥行き 60.0 cm、横 90.0 cm、高さ 116.0 cm) は暗室に設置した。ブースは中央を隔壁で仕切ることによって左右ブース上部に点灯するランプで左右異なる照明条件を設定した。ブースの内面は隔壁を含めて N6 無光沢紙で覆った。

(c) 評価形容詞対

図 9-12 に実験に使用した評価形容詞対 11 種類を示す。この 11 種類は第 6 章及び第 7 章で用いたものと同じである。評価尺度は「どちらでもない」を中心に、「やや」、「かなり」、「非常に」を両側に配置した 7 段階尺度とした。

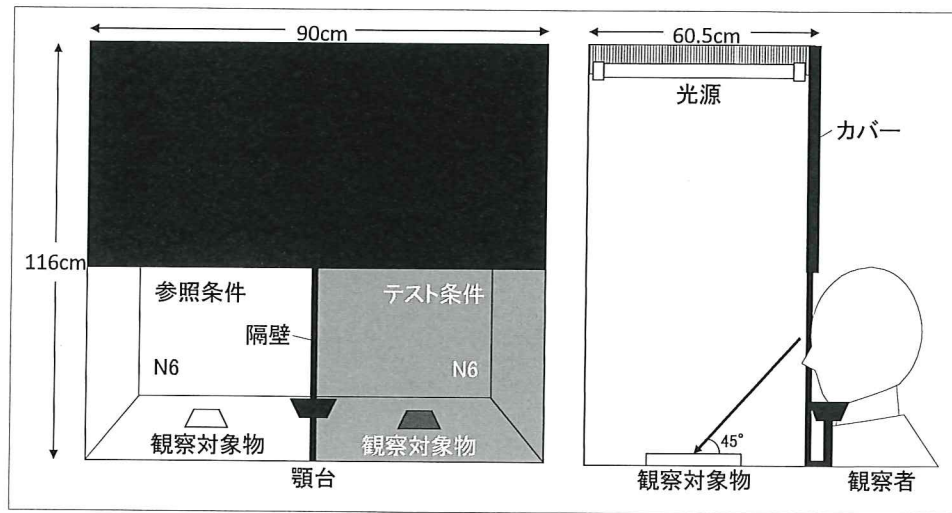


図 9-11 評価観察ブース

	非常に -3	かなり -2	やや -1	どちらでもない 0	やや +1	かなり +2	非常に +3	
No.1	地味な							派手な
No.2	濁った							澄んだ
No.3	静的な							動的な
No.4	暗い							明るい
No.5	汚い							美しい
No.6	不快な							快適な
No.7	重い							軽い
No.8	涼しい							暖かい
No.9	活気のない							活気のある
No.10	嫌いな							好きな
No.11	くすんだ							鮮やかな

図 9-12 実験に用いた評価形容詞対（11 種類）および 7 段階尺度

(d) 照明条件

赤色（主波長 630 nm）、オレンジ色（590 nm）、アンバー色（590 nm）、緑色（530 nm）、青緑色（500 nm）、青色（470 nm）の 6 色の単色 LED を組み合わせることによって様々な分光分布が実現できる LED 装置を製作した（図 9-13）。この装置は単色 LED の分光分布を組み合わせ、各 LED の発光強度を調節することによって異なる分光分布を合成することができる。図 9-14 に各単色光の発光イメージを示し、図 9-15 に各単色光の相対分光分布を示し、その xy 色度を図 9-16 に示す。

実験に用いた光源の分光分布を図 9-16 に示し、特性値（相関色温度、 G_x 、 R_a 、 R_g 、色度 xy 、偏差 Duv ）を表 9-4 に示し、照明条件を表 9-5 に示す。参照光源は美術館・博物館用の高演色形蛍光ランプ（FL-EDL）1 種類であり、テスト光源は蛍光ランプ 2 種類（FL-EDL、FL-WW）、白色 LED ランプ 6 種類（6 色混光 LED、LED-RAGB、LED-ROGB、LED-AGB、LED-RGB、LED-BY）の計 8 種類である。

白色 LED ランプの内、LED-BY を除く 5 種類（6 色混光 LED、LED-RAGB、LED-ROGB、LED-AGB、LED-RGB）は、図 9-13 の LED 照明装置によって合成した白色 LED ランプである。なお、6 色混光 LED とは赤色（R）、オレンジ色（O）、アンバー色（A）、緑色（G）、青緑色（BG）、青色（B）の単色光の組み合わせを意味し、LED-RAGB の RAGB とは赤色（R）、アンバー色（A）、緑色（G）、青色（B）の単色光の組み合わせを意味する。その他の記号の意味についても同様である。

表 9-4 の“3 色混光 LED2（LED-RGB）”は、第 9.2 節の理論計算で求めた 10 lx 下で最大の G_x を有する 3 色混光の分光分布（650 nm、530 nm、450 nm）に近似したものである（理論： G_x 66、3 色混光 LED2（LED-RGB）： G_x 65）。

照度は左右ブースの机上面照度 700 lx（高照度）、10 lx（低照度）とした。照度の調節は、光源の分光分布が変化しないように黒色木綿ラシヤ生地を遮光フィルターとして使用し、重ねの枚数を増減することによって行った。なお参照光源の照度は 700 lx 一定とした。照明条件を変化させた場合はその都度測定を行い、照度の誤差は±3%以内とした。

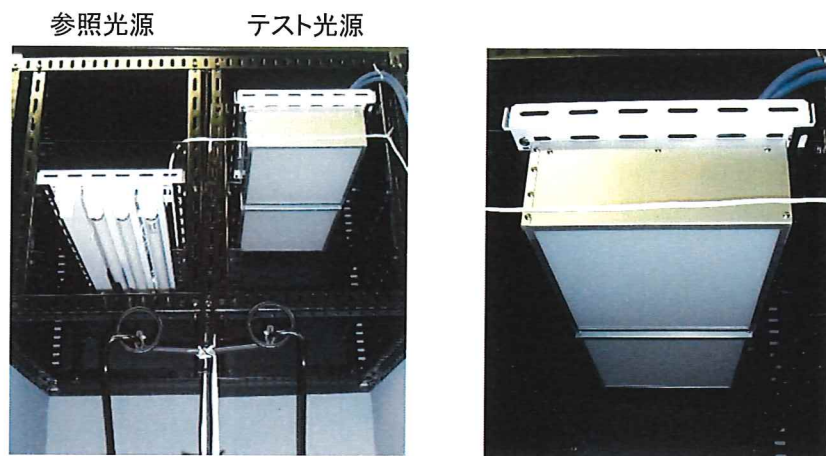


図 9-13 LED 照明装置

左：ブース上部 右：LED 照明装置を斜め下から撮影

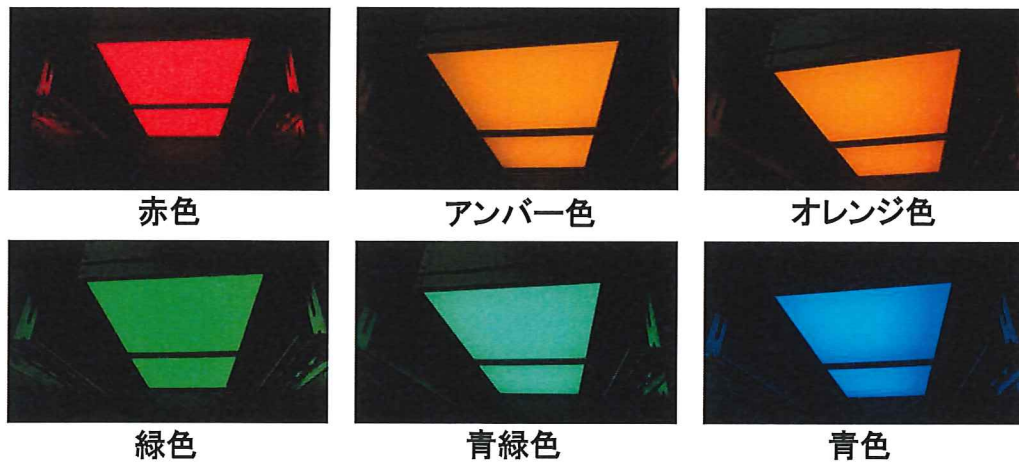


図 9-14 各単色 LED ランプの光色イメージ（最大出力点灯時に装置斜め下から撮影）

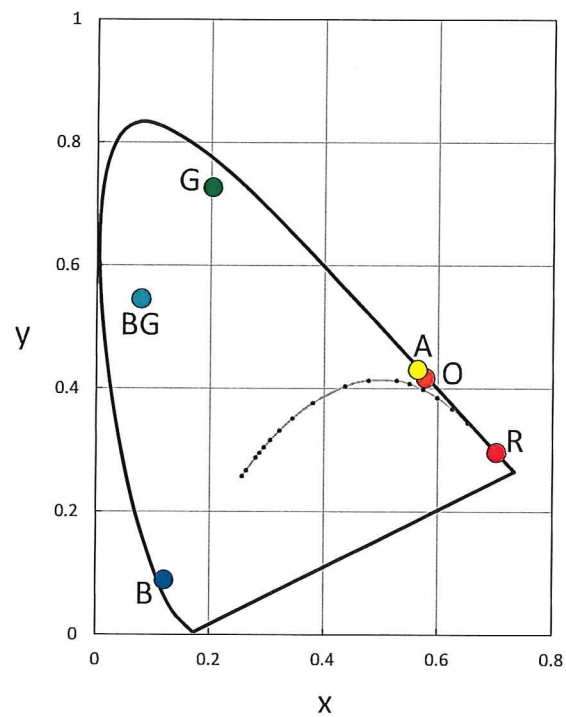
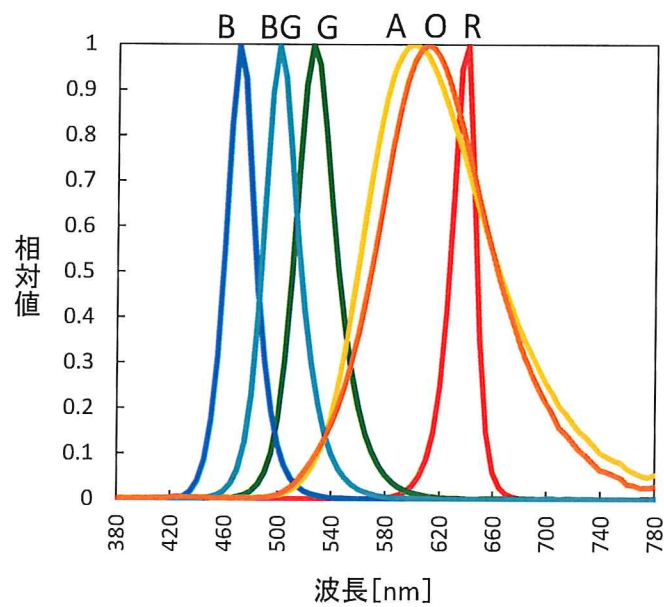
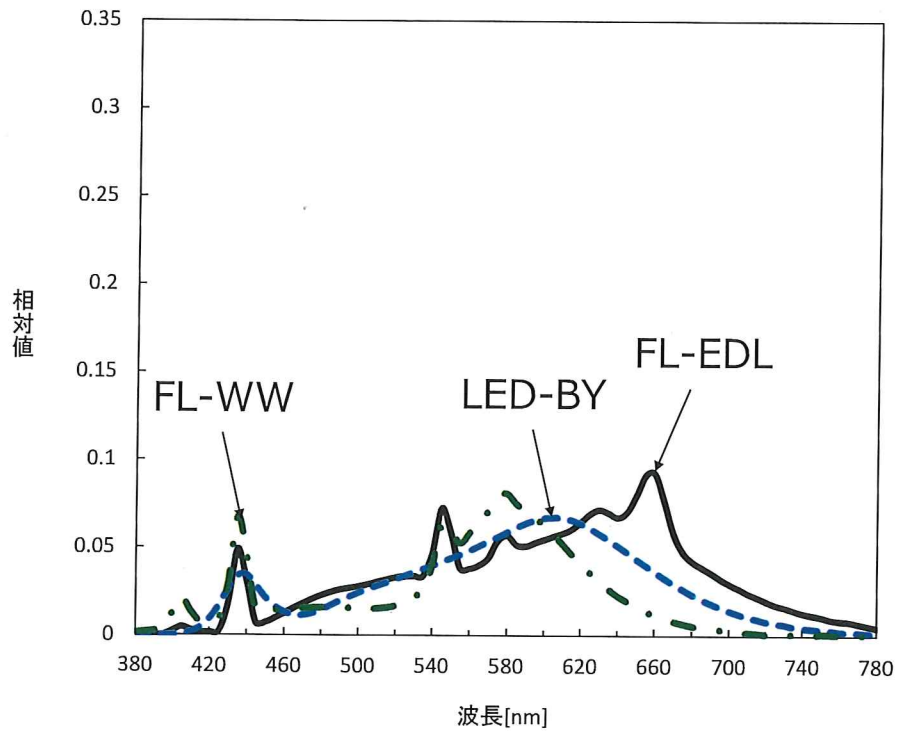
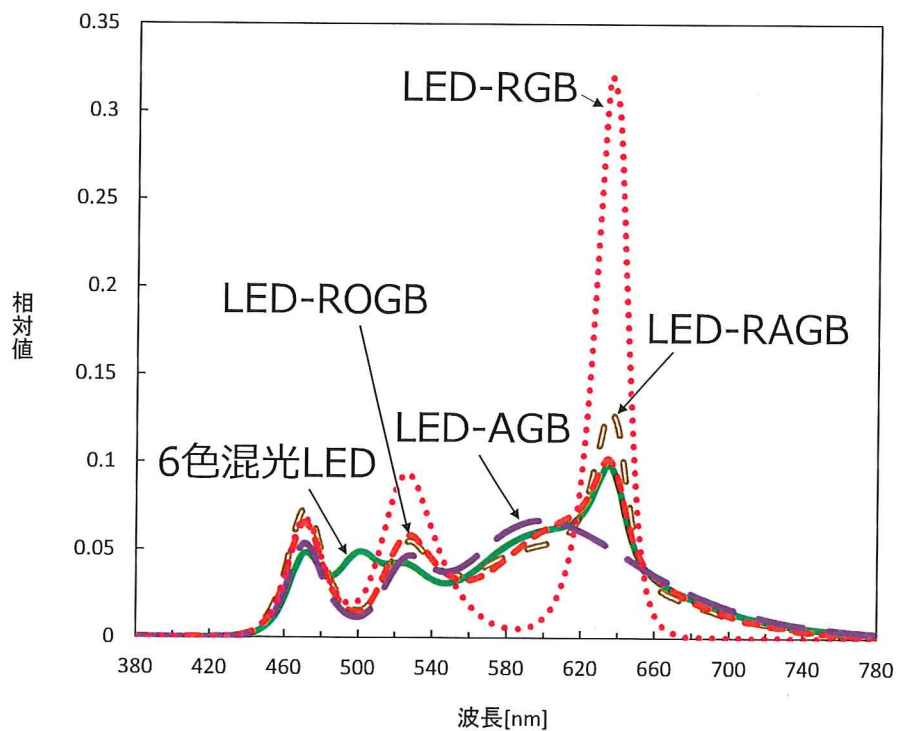


図 9-15 LED 照明装置（赤色、オレンジ色、アンバー色、緑色、青緑色、青色）の照明特性

上：各 LED ランプの相対分光分布 右：各 LED ランプの xy 色度図



(a) FL-EDL、FL-WW、LED-BY



(b) 白色混光 LED : 6色混光 LED、LED-RAGB、LED-ROGB、LED-AGB、LED-RGB

図 9-16 実験に用いた光源の相対分光分布 (同一照度で正規化)

表 9-4 用いた光源の特性（相関色温度、 G_x 、 R_a 、 R_g 、色度 xy 、 Duv ）

G_x ：照度 10 lx で算出

(CL-500Aによる測定値、ただし G_x を除く)									
	光源	略称	CCT	G_x	R_a	R_g	x	y	Duv
参照光源	高演色形蛍光灯ランプ	FL-EDL	3060	39	96	95	0.435	0.407	0.0018
	高演色形蛍光灯ランプ	FL-EDL	3060	39	96	95	0.435	0.407	0.0018
テスト光源	一般形蛍光灯ランプ	FL-WW	3460	26	55	-110	0.411	0.401	0.0030
	青色LED+黄色蛍光体タイプ	LED-BY	3060	35	84	19	0.430	0.397	-0.0017
	6色混光LED	6色混光	3080	36	82	94	0.435	0.409	0.0023
	4色混光LED1	LED-RAGB	3100	42	83	50	0.423	0.387	-0.0051
	4色混光LED2	LED-ROGB	3090	41	86	80	0.428	0.396	-0.0018
	3色混光LED1	LED-AGB	3140	33	84	19	0.434	0.416	0.0050
	3色混光LED2	LED-RGB	3050	65	21	-172	0.457	0.389	-0.0066

表 9-5 照明条件

条件	参照光源		テスト光源		実験条件名
1	700 lx	FL-EDL	700lx	FL-EDL	EDL700
2				FL-WW	WW700
3				LED-BY	BY700
4				6色混光	6色700
5				LED-RAGB	RAGB700
6				LED-ROGB	ROGB700
7				LED-AGB	AGB700
8				LED-RGB	RGB700
9			10lx	FL-EDL	EDL10
10				FL-WW	WW10
11				LED-BY	BY10
12				6色混光	6色10
13				LED-RAGB	RAGB10
14				LED-ROGB	ROGB10
15				LED-AGB	AGB10
16				LED-RGB	RGB10

(e) 観察対象物

第 5.4 節と同様の多色配色 (mosaic) を用いた (図 9-17)。この多色配色 (mosaic) は、粒子径の異なる赤色・黄色・緑色・青色の天然岩絵具 (鉱物) 16 色及び金箔 4 色の計 20 色からなる。



図 9-17 多色配色 (mosaic)

(f) 実験手順及び教示

実験手順は以下の通りである。

- ① 被験者は暗室に入室後、実験に関する教示を受ける。教示を含め、約 5 分間の暗順応を行う。
- ② 被験者は実験ブースの中央に着座し、顎台で頭部を固定する。左右の照明条件に対してそれぞれの目を 1 分から 3 分間順応させる。
- ③ 実験者が左右のブースの中央に同一の観察対象物を配置する。
- ④ 被験者は左右のそれぞれの眼で観察対象物を斜め上 45° の位置から観察し、実験者が読み上げた評価項目に対して口頭で回答する。回答はすべて実験者が用紙に記録する。
- ⑤ すべての観察対象物の評価が終了すると被験者は実験ブースから離れて待機し、実験者が照度ないしランプを変更した後、再び①からの手順を繰り返す。

①から⑤を1セッションとし、各被験者は16セッション（ランプ8種類×照度2種類＝16）を、日を変えランダム順序で3回評価した。被験者には美術館照明を想定した印象評価実験であることを事前に示し、以下の教示に基づいて評価させた。

「左ブースのサンプルの印象と比較して、右ブースのサンプルの印象がどう見えるかを評価してください。評価の際はサンプルのどこを観察していただいても構いません。正しい答えがあるわけではありません。見たまま、感じたままに直感で答えてください」。

9.3.2 結果及び考察

(a) データ処理

主観評価値は7段階尺度の各尺度間が等間隔であるとみなし、評価尺度に対し+3から-3の数値を与えた。各被験者は1照明条件につき3回の繰り返し評価を行っているため、3回の評価の平均値を各被験者の主観評価値とした。さらに被験者8人の主観評価値に対する平均値を被験者全平均値とした。

(b) 因子分析

本節で用いた混光白色LEDランプを含む異なる分光分布下での多色配色（mosaic）の色彩印象評価が、第6章と同様の評価構造で評価されているのかを検証するために、被験者8人の評価値を用いて因子分析（主因子法、バリマックス回転）を行った。700 lx及び10 lxの結果（各照度、光源8×観察対象物1×被験者8=64データセット）に対する因子分析結果を表7-6に示す。

700 lx及び10 lxの結果ともに“鮮やかさ”や“明るさ”などに関係する第1因子、“好ましさ”や“美しさ”に関係する第2因子が抽出された（第2因子までの累積寄与率700 lx：80 %、10 lx：73 %）。グルーピングされた評価形容詞対は第6章で示した“色の質の因子”、“好ましさの因子”とほぼ同様の結果であることから、第1因子は“色の質の因子”、第2因子は“好ましさの因子”と解釈することができる。

すなわち、本項で抽出した“色の質の因子”も第6章で定義した「色質」と同義であることが示された。

表 9-6 各照明下での因子分析結果

左 : 700 lx、右 : 10 lx

700 lx			10 lx		
評価形容詞対	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”	評価形容詞対	第1因子 “色の質”	第2因子 “好ましさ”
派手な—地味な	-0.87	0.46	派手な—地味な	-0.90	0.33
鮮やかな—くすんだ	-0.85	0.48	鮮やかな—くすんだ	-0.89	0.37
活気のある—活気のない	-0.84	0.45	動的な—静的な	-0.84	0.31
明るい—暗い	-0.83	0.48	活気のある—活気のない	-0.82	0.44
動的な—静的な	-0.82	0.50	澄んだ—濁った	-0.81	0.40
澄んだ—濁った	-0.81	0.53	明るい—暗い	-0.80	0.36
軽い—重い	-0.75	0.39	軽い—重い	-0.77	0.48
美しい—汚い	-0.36	0.91	好きな—嫌いな	-0.22	0.89
快適な—不快な	-0.37	0.84	美しい—汚い	-0.33	0.88
好きな—嫌いな	-0.32	0.86	快適な—不快な	-0.39	0.77
暖かい—涼しい	-0.59	0.47	暖かい—涼しい	-0.47	0.18
寄与率	46.16	33.64	寄与率	46.27	27.06
累積寄与率	46.16	79.80	累積寄与率	46.27	73.33

(c) 分光分布の違いが色彩印象に与える影響

分光分布と色彩印象の関係を検討するために、分光分布の違いが色彩印象に与える影響について検討した。

各照明下における各評価形容詞対の主観評価値（被験者全平均値）を表 9-7 に示し、標準偏差を表 9-8 に示す。図 9-18 は各照明下の主観評価プロフィールであり、縦軸の評価形容詞対は本項 (b) 因子分析で抽出された因子ごとに並べたものであり、横軸は主観評価値である（被験者全平均値）。

図 9-18 の 700 lx の主観評価プロフィールに示す実線（黒色）は参照側、テスト側左右ブースとも FL-EDL700 lx 照明下で行われた評価結果であり、すべての評価形容詞対で“0”近傍、すなわち“どちらでもない”となった。この結果は、本実験の両眼隔壁法による評価が左右眼の評価差なくほぼ正確に行われたことを意味する。

図 9-18 に示すように主観評価プロフィールは光源によって異なり、700 lx の場合 “色の質の因子” において光源間の差が顕著である。10 lx の場合はどの因子においても光源間の差

が僅かとなるが、“好ましさの因子”は“色の質の因子”に比べて照度低下による主観評価値の低下が小さく、照度の影響が僅かである。以上から、“色の質の因子”すなわち「色質」は光源の分光分布及び照度の影響を受けやすく、異なる照明下の演色性の評価に適した評価尺度であるといえる。この結果は第6章、第7章の実験結果とも一致している。

各因子と分光分布の関係についてより詳細に解析するために、“色の質の因子”、“好ましさの因子”に対する分光分布の影響を検討した。図9-19は各因子を代表する評価形容詞対に対する主観評価値と光源の関係である。各因子を表す評価形容詞対は“色の質の因子”は「派手な－地味な」、「好ましさの因子」は「快適な－不快な」とした。なお横軸の光源の順番は、図9-19左上の700 lx “色の質の因子”の結果が評価値順になるように並べた順番である。

図9-19からも明らかなように、700 lxでの“色の質の因子”、“好ましさの因子”は、ともに評価が“ポジティブ”となるグループ(LED-RGB、LED-RAGB、LED-ROGB)、評価が“0”近傍となるグループ(FL-EDL、6色混光LED)、評価が“ネガティブ”となるグループ(LED-BY、LED-AGB、FL-WW)と評価の傾向を大きく分けて3グループに捉えることができる。この傾向は各因子のその他の評価形容詞対でも同様であった。

第7.3節の結果より、多色配色を評価するときに注目している色は“赤色”であることが明らかになっていることから、本節の実験においても被験者は“赤色”に注目して評価を行っていたと考えられる。そこで、各グループの分光分布及び赤色の演色色再現の特徴ごとに、参照光源よりも赤色を高彩度に演色するグループ(LED-RGB、LED-RAGB、LED-ROGB)、参照光源と同等の赤色に演色するグループ(6色混光LED)、参照光源よりも赤色を低彩度に演色するグループ(LED-BY、LED-AGB、FL-WW)の3グループにわけて以下、700 lxの主観評価結果を考察する。

- ・ 参照光源よりも赤色を高彩度に演色するグループ(LED-RGB、LED-RAGB、LED-ROGB)

LED-RGB、LED-RAGB、LED-ROGBは、赤色、緑色、青色の波長域に強いエネルギーを有し、その他の波長域のエネルギーが小さい分光分布の特徴を有している。図9-20にも示すように、これらの光源は参照光源と比較して赤色を高彩度に演色する光源であることから、評価が“ポジティブ”となったと考えられる。

- ・ 参照光源と同等の赤色に演色するグループ(6色混光LED)

6色混光LEDは、その他の光源と比較して比較的なだらかな分光分布形状を有する光源で

ある。赤色に対する演色色再現は参照光源とほぼ同等である(図 9-21) ことから、評価が“0”近傍となったと考えられる。

- ・ 参照光源よりも赤色を低彩度に演色するグループ (LED-BY、LED-AGB、FL-WW)

LED-BY、LED-AGB、FL-WW は、長波長域(赤色)のエネルギーが小さい分光分布の特徴を有しており、図 9-22 のように参照光源と比較して赤色を低彩度に演色する光源である。すなわち、テスト光源下で観察する赤色が参照光源下で観察する赤色よりも低彩度に知覚されたことから評価が“ネガティブ”となったと考えられる。

以上のことから、700 lx 下における主観評価は赤色の演色色再現の特徴によっておおよそ説明できることがわかった。また、主観評価値に対する3グループ間の差は「好ましさの因子」よりも「色の質の因子」においてより顕著であったことから、第7章で示したように「色の質の因子」の評価は観察対象物の赤色の演色色再現が重要であることが明らかになった。

なお、10 lx については両因子ともにすべての光源で評価がマイナスを示しているが、LED-RGB はその他の光源に比べて高い主観評価値を得ている。これは、LED-RGB が用いた光源の中で最も赤色を高彩度に演色する光源であり、10 lx 下においてもその他の光源より赤色を鮮やかに演色したためであると考えられる。

表 9-7 各照明下の主観評価値（被験者全平均値）

因子名		“色の質”							“好ましさ”			その他
評価形容詞対		派手な/ 地味な	鮮やかな/ くすんだ	活気のある/ 活気のない	明るい/ 暗い	動的な/ 静的な	澄んだ/ 濁った	軽い/ 重い	美しい/ 汚い	快適な/ 不快な	好きな/ 嫌いな	暖かい/ 涼しい
照明 条件	EDL700	0.04	0.04	-0.04	-0.04	0.00	0.13	0.00	0.04	-0.08	0.00	-0.08
	WW700	-1.67	-1.58	-1.42	-1.00	-1.25	-1.71	-0.67	-0.96	-0.79	-0.96	-0.83
	BY700	-0.92	-0.83	-0.96	-0.58	-0.88	-0.83	-0.33	-0.54	-0.50	-0.38	-0.88
	6色700	-0.25	-0.21	0.04	0.04	-0.42	-0.33	-0.42	0.42	0.25	0.38	0.63
	RAGB700	1.25	1.46	1.00	1.21	1.21	1.33	1.00	0.88	0.83	0.96	-0.42
	ROGB700	0.46	0.92	0.46	0.75	0.29	0.83	0.75	-0.04	0.00	0.17	0.25
	AGB700	-1.21	-1.33	-1.17	-1.13	-1.21	-1.25	-1.17	-0.75	-0.58	-0.50	-1.25
	RGB700	2.58	2.71	2.04	2.13	2.13	2.13	1.46	1.25	1.04	0.79	1.50
	EDL10	-2.54	-2.63	-2.25	-2.50	-2.50	-2.50	-2.08	-1.54	-1.33	-1.33	-1.38
	WW10	-2.92	-2.92	-2.75	-2.88	-2.75	-2.67	-2.50	-1.96	-1.79	-1.67	-1.54
	BY10	-2.71	-2.75	-2.42	-2.79	-2.46	-2.58	-2.33	-2.00	-1.79	-1.88	-1.46
	6色10	-2.58	-2.83	-2.29	-2.54	-2.29	-2.75	-2.21	-1.75	-1.33	-1.13	-1.25
	RAGB10	-2.13	-1.88	-2.17	-2.42	-1.96	-1.96	-1.88	-1.38	-1.08	-1.25	-0.63
	ROGB10	-2.29	-2.38	-2.25	-2.50	-2.33	-2.38	-2.17	-1.46	-1.46	-1.33	-0.88
	AGB10	-2.71	-2.83	-2.63	-2.88	-2.46	-2.67	-2.42	-1.96	-1.54	-1.67	-1.54
	RGB10	-0.75	-0.58	-0.96	-1.58	-0.54	-1.17	-1.17	-0.58	-0.29	-0.75	-0.29

表 9-8 各照明下の主観評価値に対する標準偏差

因子名		“色の質”							“好ましさ”			その他
評価形容詞対		派手な/ 地味な	鮮やかな/ くすんだ	活気のある/ 活気のない	明るい/ 暗い	動的な/ 静的な	澄んだ/ 濁った	軽い/ 重い	美しい/ 汚い	快適な/ 不快な	好きな/ 嫌いな	暖かい/ 涼しい
照明 条件	EDL700	0.38	0.33	0.45	0.52	0.44	0.56	0.50	0.21	0.30	0.18	0.43
	WW700	0.36	0.35	0.43	0.25	0.39	0.38	0.82	0.55	0.35	0.12	0.25
	BY700	0.15	0.31	0.12	0.53	0.25	0.36	0.78	0.35	0.36	0.49	0.25
	6色700	0.35	0.31	0.12	0.38	0.46	0.47	0.50	0.35	0.53	0.45	0.55
	RAGB700	0.24	0.47	0.18	0.40	0.43	0.44	0.18	0.25	0.36	0.12	0.77
	ROGB700	0.31	0.24	0.43	0.39	0.38	0.25	0.39	0.79	0.53	0.73	0.83
	AGB700	0.43	0.56	0.25	0.25	0.56	0.50	0.36	0.97	0.87	1.02	0.39
	RGB700	0.50	0.45	0.55	0.71	0.47	0.71	0.64	1.33	1.29	1.15	0.56
	EDL10	0.31	0.28	0.39	0.47	0.18	0.36	0.39	1.13	1.01	1.01	0.79
	WW10	0.90	0.90	0.84	0.43	0.85	0.36	0.18	0.81	0.70	0.89	1.31
	BY10	0.38	0.35	0.50	0.35	0.50	0.43	0.36	0.76	0.83	0.73	0.92
	6色10	0.15	0.15	0.15	0.25	0.24	0.36	0.25	0.90	0.67	1.18	0.96
	RAGB10	0.24	0.18	0.28	0.31	0.38	0.24	0.17	0.61	0.56	0.71	0.96
	ROGB10	0.17	0.17	0.25	0.39	0.55	0.12	0.17	0.81	0.30	0.46	0.68
	AGB10	0.33	0.28	0.39	0.36	0.40	0.33	0.18	0.83	0.50	0.84	0.50
	RGB10	0.38	0.36	0.33	0.25	0.47	0.36	0.30	0.90	0.91	1.18	0.96

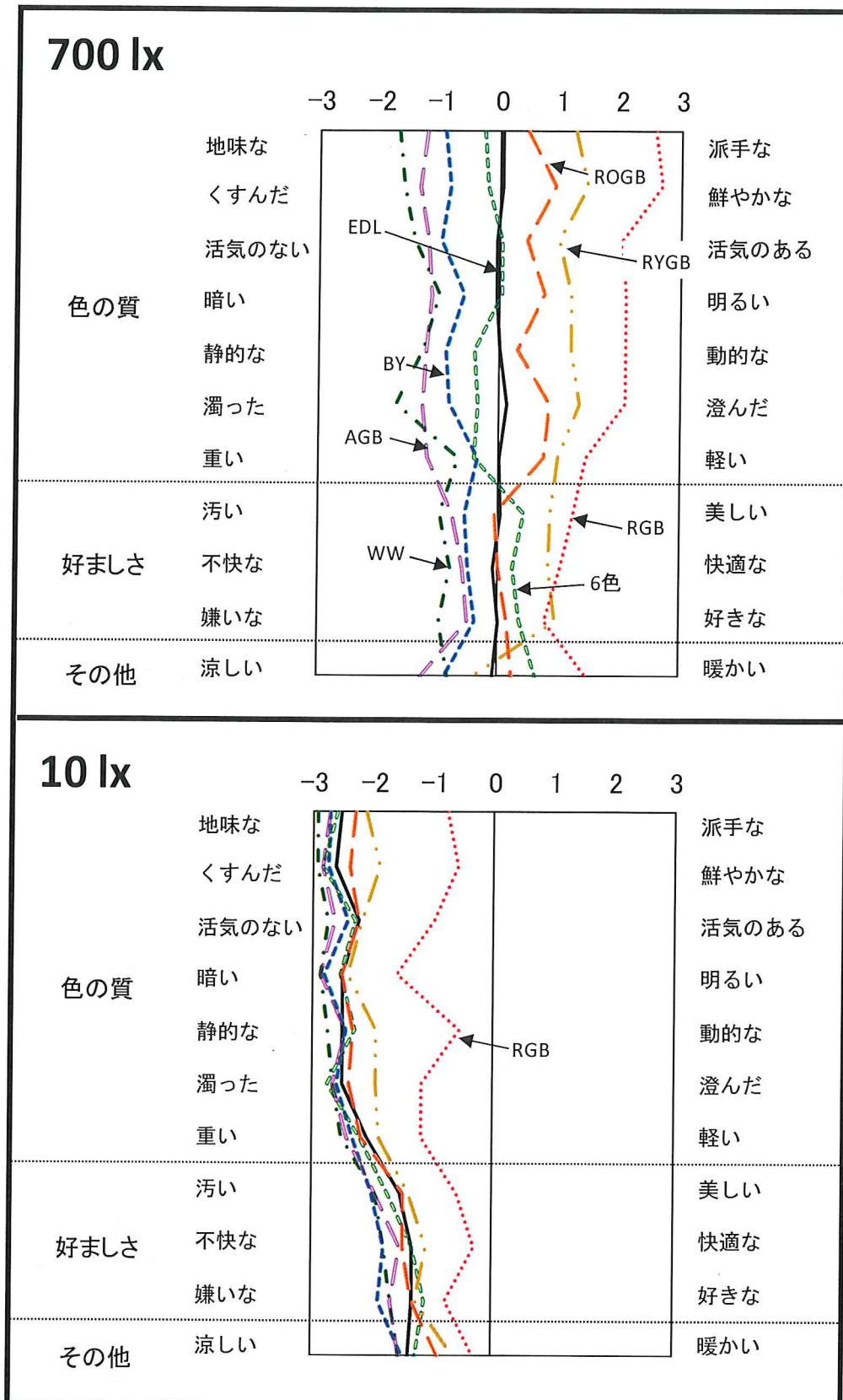


図 9-18 各照明下での主観評価プロフィール

上段：700 lx、下段：10 lx

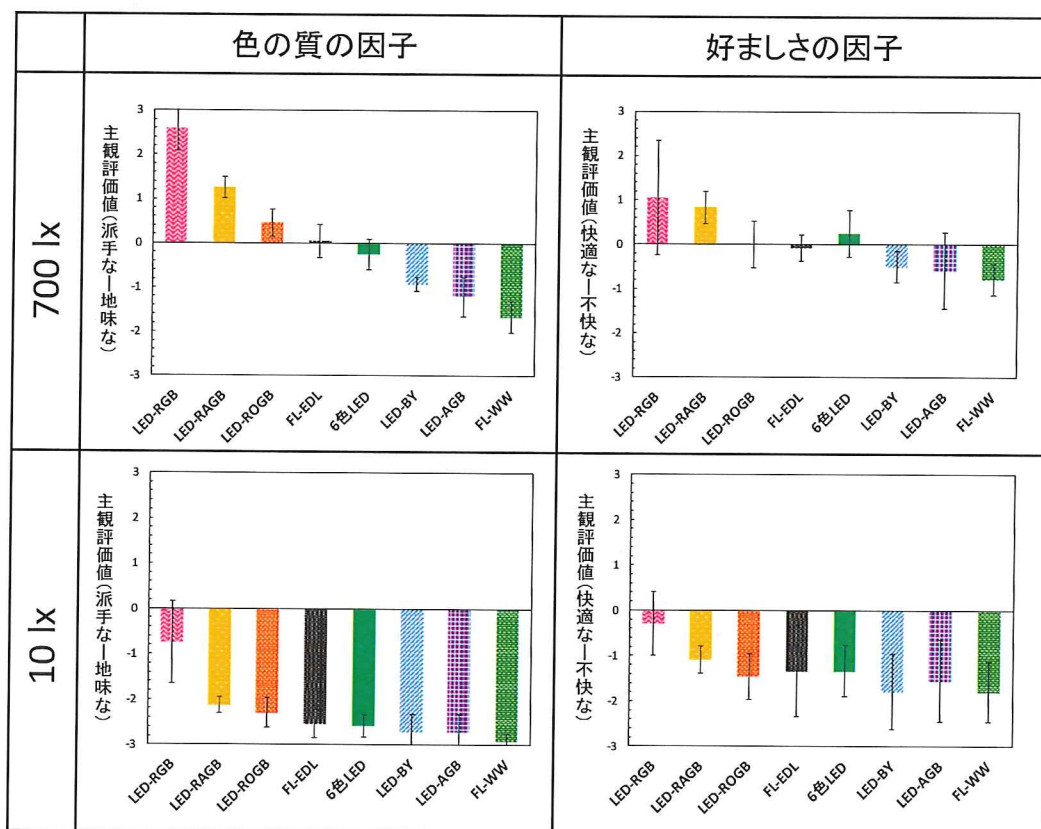


図 9-19 各因子を代表する評価形容詞対の主観評価値と光源の関係

上段：700 lx、下段：10 lx 縦軸：主観評価値、横軸：光源

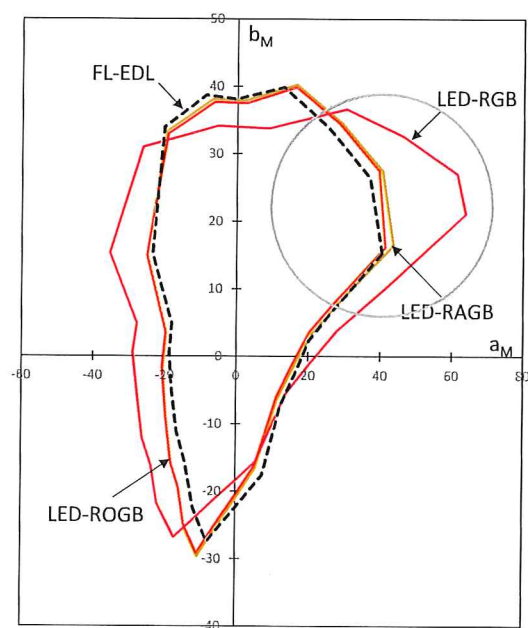


図 9-20 参照光源 FL-EDL700 lx よりも赤色を高彩度に演色する光源の色域

(LED-RGB、LED-RAGB、LED-ROGB)

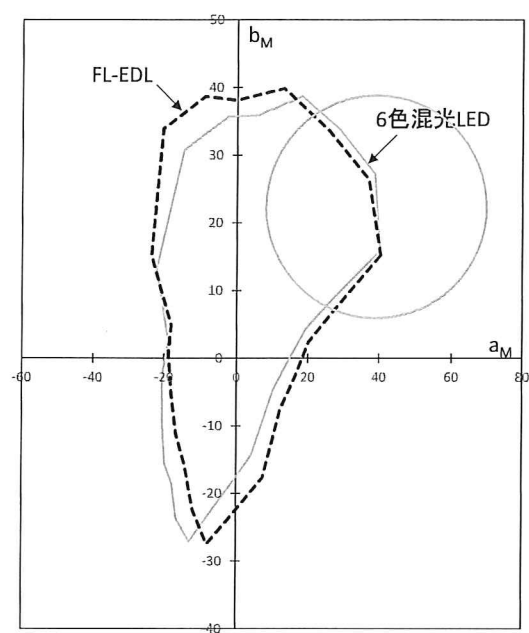


図 9-21 参照光源 FL-EDL700 lx と同等の赤色に演色する光源の色域
(6 色混光 LED)

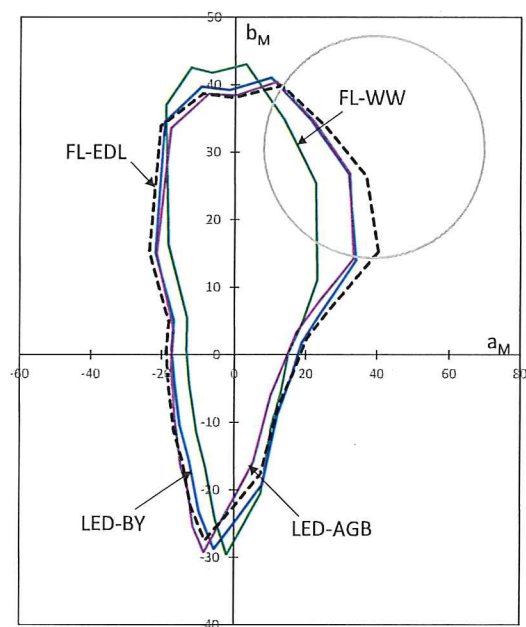


図 9-22 参照光源 FL-EDL700 lx よりも赤色を低彩度に演色する光源の色域
(LED-BY、LED-AGB、FL-WW)

(d) 「色質」の主観評価値と G_x の関係

第 9.2 節で求めた 10 lx 下で最大の G_x を有する 3 色混光の分光分布 (650 nm、530 nm、450 nm) に近似した LED-RGB が、主観的にもその他の光源に比べて高い「色質」を有しているのかを検討した。また G_x の「色質」に対する予測精度を確認するために、 G_x と本節の“色の質の因子”の主観評価結果との対応関係を調べた。

図 9-23 に各照度下の“色の質の因子”の主観評価値（「派手な—地味な」）と R_a の関係を示すように、 R_a は主観評価値とは対応していない。これは、本節で用いたテスト光源の内、FL-EDL、LED-RGB、FL-WW を除く 5 種類 (LED-BY、6 色混光 LED、LED-RAGB、LED-ROGB、LED-AGB) は R_a 82～ R_a 86 とほぼ同値であるのに主観評価値は大きくばらついていることや、LED-RGB は用いたテスト光源の中でも最も R_a の低い光源 (R_a 21) であるが主観評価値は最も高かったことなどからも明らかである。すなわち、第 5 章から第 7 章にかけて示してきたように、 R_a は低照度下の色の見えを評価するのに適切な指標ではないといえる。

図 9-24 に各照度下の“色の質の因子”の主観評価値（「派手な—地味な」）と G_x の関係を示す。図 9-24 に示すように、 G_x は主観評価値と高い相関を示している (700 lx : $R=0.94$ 、10 lx : $R=0.98$ 、1 % 有意)。また、10 lx 下で最大の G_x を有する 3 色混光の分光分布に近似した LED-RGB は、照度によらず G_x 及び主観評価値ともに最も高い値を示している。すなわち、試験色全体の色質評価数 G_x の「色質」に対する予測精度は高く、異なる照明下の「色質」は G_x によって評価できることが裏付けられた。

以上のことから、低照度下で G_x が最大となる 3 色混光の分光分布 (仮想: 650 nm/530 nm/450 nm、実際: 630 nm/530 nm/470 nm) は、低照度下の美術鑑賞に対する最適な光源の分光分布であると結論できる。

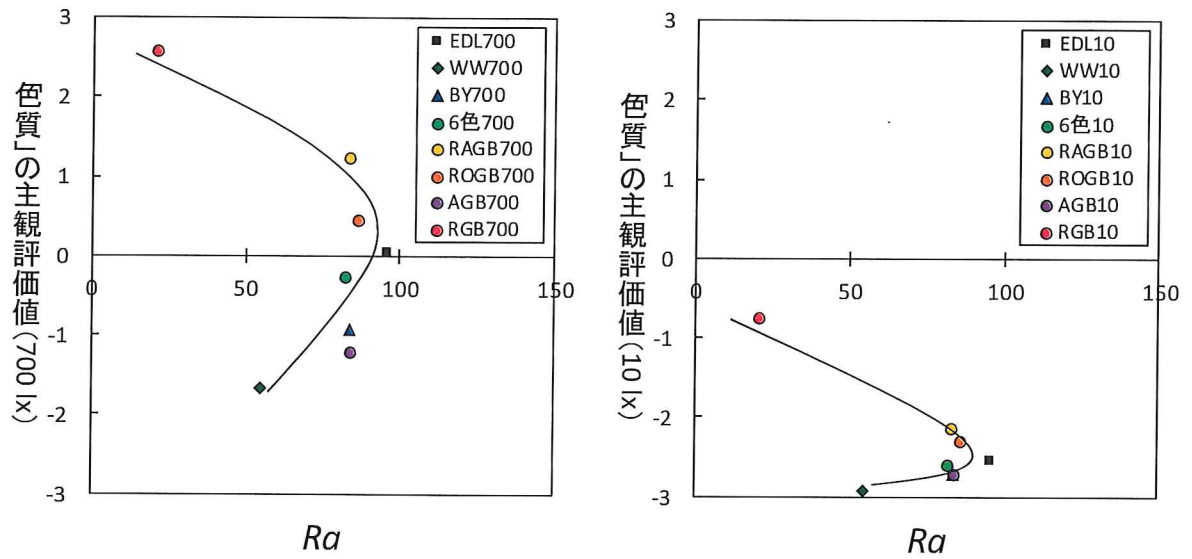


図 9-23 「色質」の主観評価値と R_a の関係

左 : 700 lx、右 : 10 lx 縦軸 : 主観評価値、横軸 : R_a

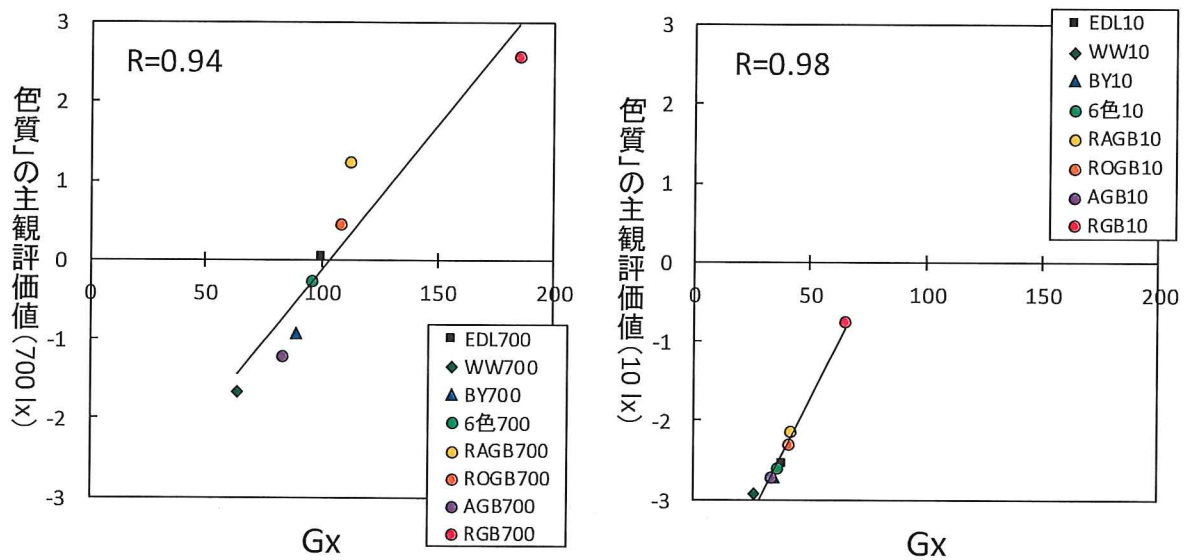


図 9-24 色質の主観評価値と G_x の関係

左 : 700 lx、右 : 10 lx 縦軸 : 主観評価値、横軸 : G_x

G_x : 左 700 lx、右 10 lx で算出

9.4 分光分布の違いによる光学的損傷係数の比較

「美術作品を照明すると照明光の一部は反射し、残りは物体内へと入る。その内、一部は物体内を透過し、残りが吸収される。展示作品に吸収された放射エネルギーは、光化学反応をもたらし、変褪色などの損傷を生じさせる⁹⁻¹³⁾」と言われているように、光源の光放射は美術作品の損傷を引き起こす。美術館では美術作品の損傷を最小限に抑える必要があり、光源が与える変褪色の影響も厳しく評価しなければならない。本節では3色混光の分光分布を含めて光源に対するハリソンの損傷係数⁹⁻¹⁴⁾を調べた。

光化学的な変褪色をあらわす数値、すなわち損傷係数としてよく知られているのがハリソンの損傷係数であり、新聞紙のような低級紙（セルロース）の損傷関数による損傷係数を提案している。ここでは表9-9に示す各種光源に対する損傷係数 DI （1 lxあたりの損傷係数）を（9-1）式を用いて求めた。各種光源の相対分光分布を図9-25に示す。

$$DI = \frac{\int_{\lambda_3}^{\lambda_1} P(\lambda) D(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \dots\dots\dots (9-1)$$

ここで $P(\lambda)$ は光源の相対分光分布、 $D(\lambda)$ は低級紙の損傷関数、 $V(\lambda)$ は標準分光視感効率を示し、 $d\lambda$ は波長間隔である。 $D(\lambda)$ 及び $V(\lambda)$ を図9-26に示す。

各種光源の損傷係数の結果を図9-27に示す。縦軸は損傷係数の高い順番に並べた光源であり、横軸はFL-EDLに対する損傷係数の相対値である。損傷係数が大きいほど、損傷の可能性が高いことを意味する。

最も損傷係数が大きいのはFL-WWであり、以下LED-BY、ハロゲン、FL-EDL、LED-RGB、LED-RAGB、LED-ROGB、6色LED、LED-AGBの順となった。FL-EDLよりも損傷係数が小さい光源は、すべて混光白色LEDであった。この理由は、ハリソンの損傷係数に用いる損傷関数は短波長域にピークを有するため、短波長のエネルギーが小さい光源ほど損傷係数は小さくなることに起因する。

以上から、3色混光のLED-RGBは低照度下においても「色質」が高く、美術館用蛍光ランプやハロゲンランプよりも損傷係数が小さい光源であることを確認した。

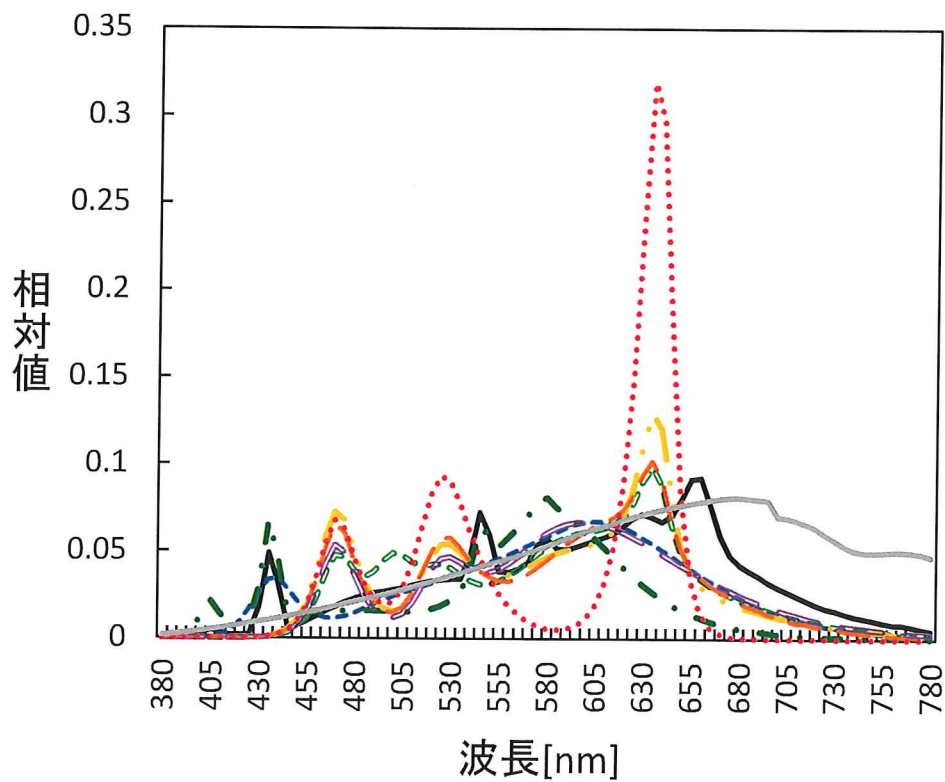


図 9-26 計算に用いた光源の分光分布（同一照度で正規化）

表 9-9 計算に用いた光源

No.	光源	略称	CCT
1	高演色形蛍光ランプ	FL-EDL	3060
2	一般形蛍光ランプ	FL-WW	3460
3	青色LED＋黄色蛍光体タイプ	LED-BY	3060
4	6色混光LED	6色混光	3080
5	4色混光LED1	LED-RAGB	3100
6	4色混光LED2	LED-ROGB	3090
7	3色混光LED1	LED-AGB	3140
8	3色混光LED2	LED-RGB	3050
9	ミラー付きハロゲンランプ	ハロゲン	2770

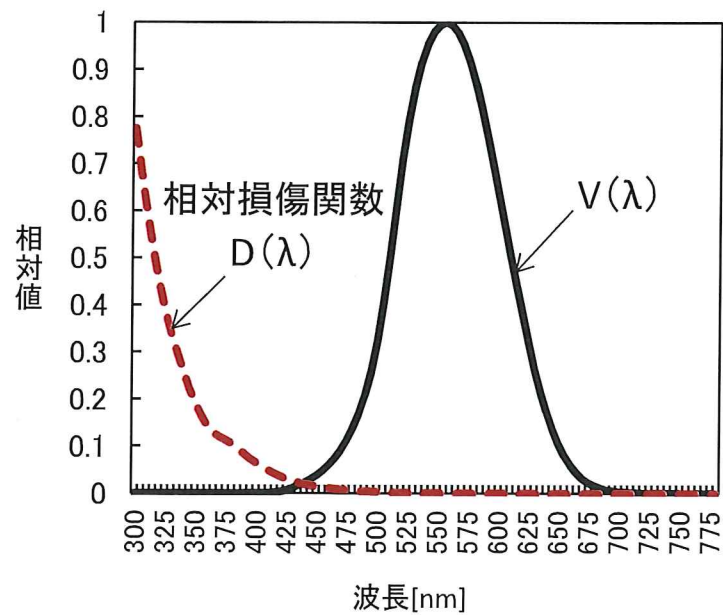


図 9-25 低級紙の損傷関数 $D(\lambda)$ および標準分光視感効率 $V(\lambda)$

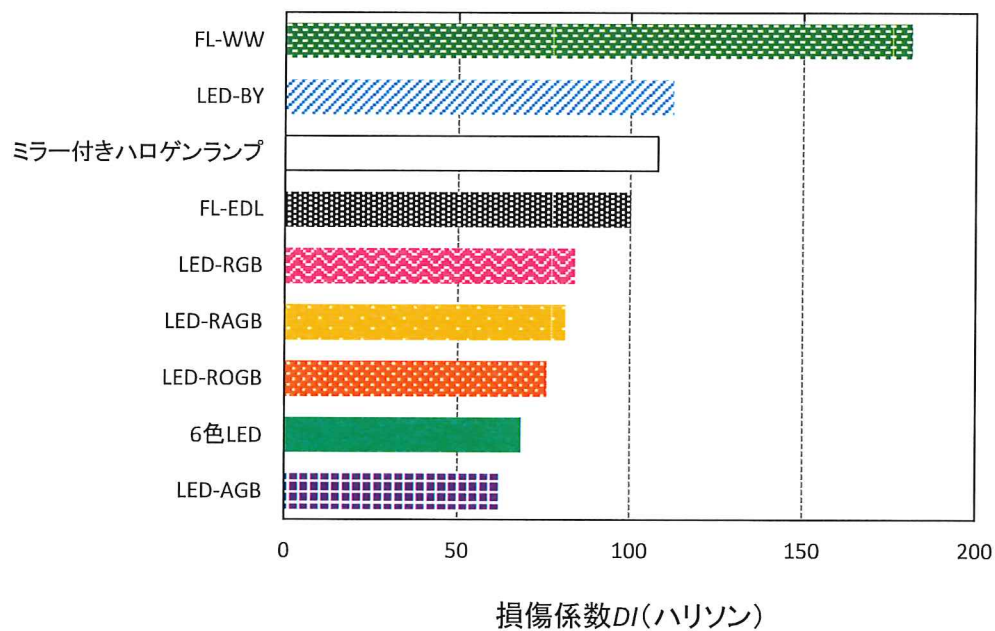


図 9-27 各光源に対するハリソンの損傷係数 (FL-EDL に対する相対値)

縦軸：光源、横軸：損傷係数

9.5 結論

本章では、第8章で示した試験色全体に対する色質評価数 G_x に基づいて低照度下の美術鑑賞に対する最適な光源の分光分布設計について検討した。得られた最適分光分布に近似した分光分布を有する光源を複数の単色 LED を組み合わせた照明装置によって再現し、その照明下で多色配色 (mosaic) の色彩印象を主観評価した。理論評価及び主観評価実験により、以下のことが明らかになった。

1. 理論評価の結果、低照度下で G_x が最大となる分光分布は3色混光白色光であった（主波長 650 nm / 530 nm / 450 nm）。
2. 「色質」の主観評価結果は G_x と良好に対応しており、 G_x を用いた最適分光分布の予測精度が高いことを示した。低照度下で G_x が最大となる分光分布（理論：主波長 650 nm / 530 nm / 450 nm、実際：主波長 630 nm / 530 nm / 470 nm）は、低照度下の美術鑑賞に対する最適な光源の分光分布であることが裏付けられた。
3. 光源による損傷の観点から、分光分布に対する損傷係数を検討した結果、3色混光の狭帯域分光分布は美術館用蛍光灯やハロゲンランプよりも損傷係数が小さく、保存科学の面においても美術館照明として有利であることを示した。

以上から、赤色（主波長約 650 nm）、緑色（約 530 nm）、青色（約 450 nm～470 nm）を混光した白色 LED ランプは、低照度下における美術鑑賞に最適な光源の分光分布であると結論できる。

第 1 0 章

総括

第10章 総括

本研究の目的は、美術館の最適な照明及び色彩視環境のための光源のあり方を検討することである。また異なる照明下での色の見えを明らかにし、それに基づいた美術館照明のための新しい演色性評価方法を開発することである。

本章では、第1章から第9章までの結果を整理し、以下、美術館の最適な照明・色彩視環境のための光源のあり方について総括する。

第1章では、美術館の照明・色彩視環境における問題、課題を整理し、本研究に至る背景及び目的、意義を明示した。

第2章では、演色性及び照度と色の見えに関する諸研究、さらに最適な美術館照明に関する諸研究を概観し、本研究の位置づけ、及び目的を明らかにした。

第3章では、美術館照明の現状を把握するために実施した国内美術館の光源及び照度の実態調査結果を述べ、美術館照明の問題、課題を提起した。

第4章では、美術館用高演色形蛍光ランプ照明について、照度を変化させたときの色の見えの変化を測色計算解析及び主観評価実験により検討し、異なる照度下での色の見えが R_a 、 R_i で評価できるのかを検証した。両眼隔壁法による等色実験の結果、たとえ美術館・博物館用の高演色形蛍光ランプであっても、照度が低下することによって見かけの明るさや鮮やかさが失われることを確認した。すなわち CIE/JIS 平均演色評価数 R_a 、特殊演色評価数 R_i は低照度下の色の見えを表しておらず、美術館照明の指標として適さないことを示した。

第5章では、美術館照明の演色性評価として“色彩印象の評価方法”が有効であるか否かを検討するために、2色配色の色彩印象に対する分光分布及び照度の影響をSD法によって評価し、それを検証した。主観評価実験及びCIECAM02による測色解析によって、異なる照明下の2色配色の色彩印象は、評価形容詞対及び2色配色構成色、特に赤色系の色の影響を受けることが明らかになった。すなわち“色彩印象の評価方法”は美術館照明の演色性評価として有効であることを確認した。

第6章では、美術館照明における演色性の考え方を整理し、分光分布、照度が異なる照明

下で有彩色物体の色の見えがどのような評価尺度に基づいて評価されているのかを主観評価実験によって検討した。その評価構造を考察することによって演色性に対する照度の効果を定量的に評価できる尺度を抽出した。その結果、新しい評価尺度「色質」として「高照度から低照度に設定される美術館照明下の作品鑑賞の視点において、知覚的な鮮やかさ、明るさに基づく色の見えの印象が最低限補償されることによって生じる満足感（色の全体印象、色の豊富さ）に対応する尺度」と定義した。

第7章では、「色質」が光源の分光分布、照度、観察対象物の色彩特性（色相、鮮やかさ、色の面積）に依存することを3種類の主観評価実験により明らかにした。実験の結果は、光源の分光分布、照度に関係なく、観察対象物に含まれる赤色系の色相が「色質」の違いを判断するのに重要な役割を果たしていることを示した。

異なる照度下の演色性の違いを「色質」であらわす場合、観察対象物に赤色を含むこと、及びある程度大きな面積が必要である。すなわち異なる照明下での「色質」を適切に評価するためには、光源の分光分布、照度、観察対象物の色彩特性を考慮した新しい演色性評価方法が必要であることを明確にした。

第8章では、第4章から第7章までの実験結果に基づいて、分光分布及び照度が異なる照明下での「色質」を評価できる美術館照明用の新しい演色性評価方法を確立するために「色質評価数」を検討した。異なる照明下の試験色全体の「色質」を G_x 、個々の試験色から受ける「色質」を R_{xi} と定めた。

G_x 及び R_{xi} と「色質」の主観評価値との関係から、異なる照明下での「色質」は G_x 及び R_{xi} と相関が高く、これらの指標を用いることによって「色質」を定量的に評価できることを確認した。すなわち異なる照明下の美術作品の「色質」は、 R_{xi} 及び G_x で評価できることを提案した。

第9章では、第8章で示した試験色全体に対する色質評価数 G_x に基づいて低照度下の美術鑑賞に対する最適な光源の分光分布設計について検討した。仮想分光分布の理論計算の結果、低照度下で G_x が最大となる分光分布は、赤色（主波長約 650 nm）、緑色（約 530 nm）、青色（約 470 nm）を混光した白色光であることを明らかにした。

理論計算により得られた最適分光分布に近似した分光分布を有する光源を複数の単色 LED を組み合わせた照明装置によって再現し（実際：630 nm、530 nm、470 nm）、その

照明下で多色配色 (mosaic) の色彩印象を主観評価した。その結果、「色質」の主観評価結果は G_x と良好に対応しており、 G_x を用いた最適分光分布の予測精度が高いことを示した。すなわち低照度下で G_x が最大となる分光分布 (仮想: 650 nm、530 nm、450 nm、実際: 630 nm、530 nm、470 nm) は、低照度下の美術鑑賞に対する最適な光源の分光分布であることが裏付けられた。

さらに光源による損傷の観点から、分光分布に対する損傷係数を検討した結果、3色混光の狭帯域分光分布は美術館用蛍光灯やハロゲンランプよりも損傷係数が小さく、保存科学の面においても美術館照明として有利であることを示した。

以上から、赤色 (主波長約 650 nm)、緑色 (約 530 nm)、青色 (約 450 nm ないし 470 nm) を混光した白色 LED ランプは、低照度下における美術鑑賞に最適な光源の分光分布であると結論した。

本研究で提案した色質評価数 G_x 、 R_{xi} については、多くの実用ランプ及び美術作品を含む観察対象物による主観評価実験とその結果との対応関係を検証する必要がある。また、本研究で実施した主観評価実験は、限られた評価形容詞対によって評価したものであり、美術鑑賞を視点とした“満足感”や“鑑賞のし易さ”などを評価しているわけではない。今後はこれらの主観評価値と色質評価数 G_x 、 R_{xi} の関係についても確認する必要がある。従って、美術館の照明・色彩視環境の「色質」に対しては、今後さらなる検証、検討が必要である。

参考文献

第1章

- (1-1) 博物館法：<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S26/S26HO285.html>
- (1-2) 全国大学博物館学講座協議会西日本部会編：「新しい博物館学」、芙蓉書房出版、(2008)
- (1-3) 日本照明委員会：「博物館展示物の光放射による損傷の抑制（CIE 157: 2004、日本語訳）」、日本照明委員会、(2005)
- (1-4) 登石久美子：「博物館・美術館の昼光照明計画」、照学誌、83-12、pp.895-900、(1999)
- (1-5) Publ. CIE：「Control of damage to museum objects by optical radiation (CIE E 157: 2004)」、CIE、(2004) .
- (1-6) 日本照明委員会：「博物館・美術館のあかりー展示空間の演出と展示物の保護」、第13回JCIEセミナー資料、p.5、(2005)
- (1-7) JIS Z 9110: 2010：「照明基準総則」、日本工業規格、(2010)
- (1-8) 神庭信幸：「東京国立博物館の保存環境の管理」、文化財の虫菌害 61 号、pp.3-9、(2011)
- (1-9) 文化庁：「国宝・重要文化財の公開に関する取扱要項の制定について」、http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/nc/t19960712001/t19960712001.html
- (1-10) R. W. G. Hunt：「Light and dark adaptation and the perception of color」、*J. Opt. Soc. Am.*、42-3、pp.190-199、(1952)
- (1-11) A. A. Kruithof：「Tubular luminescence lamps for general illumination」、Philips Techn. Rev.、6、pp.65-96、(1941)
- (1-12) C. Cuttle：「Light for Art's Sake: Lighting for Artworks and Museum Displays」、Routledge、(2007)
- (1-13) R. S. Berns：「A Color Target for Museum Applications」、18th Color Imaging Conference Final Program and Proceedings、pp.27-32、(2010)
- (1-14) R. S. Berns：「Designing white-light LED lighting for the display of art: A feasibility study」、*Color Res. Appl.*、36-5、pp.324-334、(2011)
- (1-15) F. Viénot、G. Coron and B. Lavédrine：「LEDs as a tool to enhance faded colours of museums artefacts」、*J. Cult. Herit.*、12-4、pp.431-440、(2011)

- (1-16) A. Thorseth, D. D. Corell, P. B. Poulsen, S. S. Hansen, C. Dam-Hansen :
「Museum lighting for golden artifacts, with low correlated color temperature, high color uniformity and high color rendering index, using diffusing color mixing of red, cyan, and white-light-emitting diodes」, Proc. SPIE, 8278, (2012)
- (1-17) N. Yoshizawa, T. Fujiwara and T. Miyashita : 「A study on the appearance of paintings in the museum under violet and blue LED」, Proceedings of CIE2013, CIEx038 : 2013, pp.374-381, (2013)
- (1-18) X. Mou, R. S. Berns : 「Design of LED for museum lighting application」, Proceedings of CIE2013, CIEx038 : 2013, pp.758-766, (2013)
- (1-19) A. Liu, A. Tuzikas, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta and M. Shur :
「Cultural preferences to color quality of illumination of different artwork objects revealed by a color rendition engine」, IEEE Photonics Journal, 5-4, 6801010, (2013)
- (1-20) J. Schanda, P. Csuti and F. Szabó : 「A new concept of color fidelity for museum lighting」, LEUKOS, doi : 10.1080/15502724.2014.978503, (2014)
- (1-21) J. Schanda, P. Csuti and F. Szabó : 「Colour fidelity for picture gallery illumination, Part 1: Determining the optimum light-emitting diode spectrum」, *Light. Res. Technol.*, doi : 10.1177/1477153514538643, (2014)
- (1-22) P. Csuti, A. Fáy, J. Schanda, F. Szabó, V. Tátrai : 「Colour fidelity for picture gallery illumination, Part 2: Test sample selection – museum tests」, *Light. Res. Technol.*, doi : 10.1177/1477153514555425, (2014)
- (1-23) Q. Y. Zhai, M. R. Luo and X. Y. Liu : 「The impact of illuminance and colour temperature on viewing fine art paintings under LED lighting」 *Light. Res. Technol.*, doi : 10.1177/1477153514541832, (2014)
- (1-24) 石井美恵、森山巖興、戸田雅宏、河本康太郎、齊藤昌子 : 「白色 LED ランプに対する天然染料染色布とブルースケールの変退色挙動 : 美術・博物館用照明としての適性検証」, 照学誌, 91-2, pp.78-86, (2007)
- (1-25) A. Tuzikas, A. Žukauskas, R. Vaicekauksas, A. Petrulis, P. Vitta and M. Shur : 「Artwork visualization using a solid-state lighting engine with controlled photochemical safety」, Optics Express, 22-14, pp.16802-16818, (2014)

- 14)
- (1-26) 齊藤昌子、中村弥生、森山巖與、河本康太郎：「白色 LED ランプの美術・博物館用照明としての適性 一天然染料染色布の変退色一」、照学誌、98-11、pp.585-592、(2014)
 - (1-27) JIS Z 8726：「光源の演色性評価方法」、日本工業規格、(1990)
 - (1-28) 渕田隆義：「光源の演色性：高品位化光源の最近の動向」、色材、64-5、pp.321-330、(1991)
 - (1-29) JIS Z 9112：2012：「蛍光ランプ・LED の光原色及び演色性による区分」、日本工業規格、(2012)
 - (1-30) G. Thomson：「The Museum Environment、2nd Edition」、Butterworth Heinemann、p.207、(1986)
 - (1-31) 藤原工：「学芸員のための展示照明ハンドブック」、講談社、p.17、(2014)
 - (1-32) 色彩科学ハンドブック：「新編 色彩科学ハンドブック【第3版】」、東京大学出版会、p.549、(2011)
 - (1-33) JIS Z 8723：2000：「表面色の視感比較方法」、日本工業規格、(2000)
 - (1-34) たとえば、N. Narendran、L. Deng：「Color rendering properties of LED light sources」、Solid State Lighting II：Proceedings of SPIE 4776、pp.61-67、(2002)
 - (1-35) Y. Ohno：「Color rendering and luminous sufficiency of white LED spectra」、Proceedings of SPIE 5530、(2004)

第2章

- (2-1) R. W. G. Hunt：「Light and dark adaptation and the perception of color」、*J. Opt. Soc. Am.*、42-3、pp.190-199、(1952)
- (2-2) R. W. G. Hunt：「The Perception of Color in 1° Fields for Different States of Adaptation」、*J. Opt. Soc. Am.*、43-6、pp.479-484、(1953)
- (2-3) R. W. G. Hunt：「The reproduction of colour：In photography, printing & television (4th ed.)」、Fountain Press England、(1987)
- (2-4) J. C. Shin、H. Yaguchi and S. Shioiri：「Change of color appearance in photopic, mesopic and scotopic vision」、Optical Review、11-4、pp.265-271、(2004)

- (2-5) J. C. Shin、N. Matsuki、H. Yaguchi and S. Shioiri : 「A color appearance model application in mesopic vision」、*Optical Review*、11-4、pp.272-278、(2004)
- (2-6) 湯尻照 : 「色票の色の見えの輝度レベルによる変化」、*光学*、18-4、pp.208-214、(1989)
- (2-7) 湯尻照 : 「照度レベルによる表面色の明るさの変化」、*照学誌*、74-10、pp.668-673、(1990)
- (2-8) 湯尻照 : 「照度レベルによる表面色の見えの変化と個人差」、*光学*、19-9、pp.601-609、(1990)
- (2-9) 門馬智春、本間園乃枝、矢口博久、塩入諭、羽石秀昭、三宅洋一 : 「両眼隔壁等色による薄明視における表面色の見えの測定」、*光学*、22-5、pp.273-280、(1993)
- (2-10) B. H. Crawford : 「Just Perceptible Colour Differences in Relation to Level of Illumination」、*Studies in Conservation*、18、pp.159-166、(1973)
- (2-11) K. Knoblauch、F. Saunders、M. Kusuda、R. Hynes、M. Podgor、K. E. Higgins、F. M. de Monasterio : 「Age and illuminance effects in the Farnsworth-Munsell 100-hue test」、*Appl Opt.*、26-8、pp.1441-1448、(1987)
- (2-12) 矢野正、下村容子、橋本健次郎、金谷末子 : 「高齢者の色識別性 : 光色との関係」、*色学誌*、17-2、pp.107-118、(1993)
- (2-13) T. Ishida : 「Color identification data obtained from photopic to mesopic illuminance levels」、*Color Res. Appl.*、27-4、pp.252-259、(2002)
- (2-14) 河本健一郎、和氣典二、和氣洋美 : 「基本色名に基づく色分類における照度の影響 : 明所視における若年者と高齢者の比較」、*色学誌*、37-2、pp.83-92、(2013)
- (2-15) 芦澤昌子、池田光男 : 「生活視作業への照度レベルの影響」、*色学誌*、16-2、pp.97-104、(1992)
- (2-16) P. R. Boyce : 「Investigations of the subjective balance between illuminance and lamp colour properties」、*Light. Res. Technol.*、9-1、pp.11-24、(1977)
- (2-17) P. R. Boyce and C. Cuttle : 「Effect of correlated colour temperature on the perception of interiors and colour discrimination performance」、*Light. Res. Technol.*、22-1、pp.19-36、(1990)
- (2-18) F. Viénot、M. L. Durand and E. Mahler : 「Kruithof's rule revisited using LED illumination」、*Journal of Modern Optics*、56-13、pp.1433-1446、(20

- 09)
- (2-19) A. A. Kruithof : 「Tubular luminescence lamps for general illuminaiton」 、
Philips Technical Review、6-3、pp.65-96、(1941)
 - (2-20) 久保千穂、山羽和夫、阿山みよし : 「店舗照明を想定した LED 照明の照度と色温
度による快適性」 、照学誌、97-2、pp.77-81、 (2013)
 - (2-21) 湯尻照 : 「照度レベルと光源の演色性の違いによる物体色の明るさ感」 、照学誌、
72-2、pp.69-73、 (1988)
 - (2-22) 中村肇、唐沢宜典 : 「照度・色温度と雰囲気の好ましさの関係」 、照学誌、81-8A、
pp.69-76、 (1997)
 - (2-23) Publ. CIE : 「Method of Measuring and Specifying Colour Rendering of Lig
ht Sources (CIE 013.3-1995) 」 、CIE、 (1995)
 - (2-24) JIS Z 8726 : 「光源の演色性評価方法」 、日本工業規格、 (1990)
 - (2-25) D. B. Judd : 「A flattery index for artificial illuminants」 、*Illum. Eng.*、62、
pp.593-598 、 (1967)
 - (2-26) W. A. Thornton : 「Color-Discrimination Index」 、JOSA、62-2、pp.191-194、
(1972)
 - (2-27) 橋本健次郎、矢野正、納谷嘉信 : 「目立ち指数の実用化式の提案」 、照学誌、84-1
1、pp.843-850、 (2000)
 - (2-28) K. Hashimoto、T. Yano、M. Shimizu and Y. Nayatan : 「New method for s
pecifying color-rendering properties of light sources based on feeling of con
trast」 、*Color Res. Appl.*、32-5、pp.361-371、 (2007)
 - (2-29) K. Smet、W. R. Ryckaert、M. R. Pointer、G. Deconinck and P. Hanselaer :
「Optimal colour quality of LED clusters based on memory colours」 、*Ener
gy and Buildings*、49、pp.216-225、 (2012)
 - (2-30) H. Yaguchi、Y. Takahashi and Y. Mizokami : 「Categorical Colour Renderin
g Index based on the CIECAM02」 、12th Congress of the International AI
C Colour Association、Proceedings (Volume 4) 、pp.1441-1444、 (2013)
 - (2-31) F. Szabó、I. Zilizi、P. Bodrogi and J. Schanda : 「Visual Experiments on co
lour harmony : A formula and a rendering index」 、 (2013)
 - (2-32) 瀧田隆義 : 「光源の演色性 : 高品位化光源の最近の動向」 、色材、64-5、pp.321-3
30、 (1991)

- (2-33) Y. Ohno : 「Spectral design considerations for white LED color rendering」 、
Optical Engineering, 44-11, 111302、 (2005)
- (2-34) K. Smet、 J. Schanda、 L. Whitehead、 M. R. Luo : 「TC1-69 report The CRI
2012 Colour」
- (2-35) C. J. Bartleson : 「Memory Colors of Familiar Objects」 、 *J. Opt. Soc. Am.*、
50-1、 pp.73-77、 (1960)
- (2-36) S. M. Aston and H. E. Ballchamber : 「Illumination, colour rendering and
visual clarity」 、 *Light. Res. Technol.*、 1-4、 pp.104-106、 (1969)
- (2-37) D. L. MacAdam : 「Quality of Color Reproduction」 、 *Journal of the SMPTE*、
56-5、 pp.487-512、 (1951)
- (2-38) F. Ebner、 M. D. Fairchild : 「Development and testing of a color space (IP
T) with improved hue uniformity」 、 IS&T 6th Color Imaging Conference. S
pringfield, VA: IS&T、 pp.8-13、 (1998)
- (2-39) K. Smet、 W. R. Ryckaert、 M. R. Pointer、 G. Deconinck and P. Hanselaer :
「Colour Appearance Rating of Familiar Real Objects」 、 *Color Res. Appl.*、
36-3、 pp.192-200、 (2011)
- (2-40) D. L. Loe、 E. Rowlands and N. F. Watson : 「Preferred lighting conditions
for the display of oil and watercolour paintings」 、 *Light. Res. Technol.*、 14-
14、 pp.173-192、 (1982)
- (2-41) N. Yoshizawa、 T. Fujiwara and T. Miyashita : 「A study on the appearance
of paintings in themuseum under violet and blue LED」 、 *Proceedings of th
e CIE Centenary Conference "Toward a New Century of Light" Paris*、 pp.3
74-381、 (2013)
- (2-42) Q. Y. Zhai、 M. R. Luo and X. Y. Liu : 「The impact of illuminance and col
our temperature on viewing fine art paintings under LED lighting」 、 *Light.
Res. Technol.*、 doi : 10.1177/1477153514541832、 (2014)
- (2-43) M. Scuello、 I. Abramov、 J. Gordon and S. Weintraub : 「Museum lighting :
Optimizing the illuminant」 、 *Color Res. Appl.*、 29-2、 pp.121-127、 (2004)
- (2-44) M. Scuello、 I. Abramov、 J. Gordon and S. Weintraub : 「Museum lighting:
why are some illuminants preferred? 」 、 *J Opt Soc Am A Opt Image Sci V
is*、 21-2、 pp.306-311、 (2004)

- (2-45) P. D. Pinto, J. M. M. Linhares and S. M. C. Nascimento : 「Correlated color temperature preferred by observers for illumination of artistic paintings」 、 *J. Opt. Soc. Am. A.*、 25-3、 pp.623-630、 (2008)
- (2-46) S. M. C. Nascimento and O. Masuda : 「Best lighting for visual appreciation of artistic painting—experiments with real paintings and real illumination」 、 *J. Opt. Soc. Am. A.*、 31-4、 pp.214-219、 (2014)
- (2-47) X. Mou, R. S. Berns : 「Design of LED for museum lighting application」 、 *Proceedings of the CIE Centenary Conference "Toward a New Century of Light" Paris*、 pp.758-766、 (2013)
- (2-48) J. Schanda, P. Csutia and F. Szabó : 「A New Concept of Color Fidelity for Museum Lighting」 、 *LEUKOS: The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*、 DOI:10.1080/15502724.2014.978503、 (2014)
- (2-49) J. Schanda, P. Csuti and F. Szabó : 「Colour fidelity for picture gallery illumination, Part 1: Determining the optimum light-emitting diode spectrum」 、 *Light. Res. Technol.*、 doi : 10.1177/1477153514538643、 (2014)
- (2-50) P. Csuti, A. Fáy, J. Schanda, F. Szabó and V. Tátrai : 「Colour fidelity for picture gallery illumination, Part 2: Test sample selection – museum tests」 、 *Light. Res. Technol.*、 doi : 10.1177/1477153514555425、 (2014)
- (2-51) W. A. Thornton : 「The high visual efficiency of prime color lamps」 、 *Lighting Design & Application*、 5-11、 pp.35-41、 (1975)
- (2-52) R. S. Berns : 「Designing white-light LED lighting for the display of art: A feasibility study」 、 *Color Res. Appl.*、 36-5、 pp.324-334、 (2011)
- (2-53) F. Viénot, G. Coron and B. Lavédrine : 「LEDs as a tool to enhance faded colours of museums artefacts」 、 *J. Cult. Herit.*、 12-4、 pp.431-440、 (2011)
- (2-54) A. Liu, A. Tuzikas, A. Žukauskas, R. Vaicekauskas, P. Vitta and M. Shur : 「Cultural preferences to color quality of illumination of different artwork objects revealed by a color rendition engine」 、 *IEEE Photonics Journal*、 5-4、 6801010、 (2013)
- (2-55) A. Thorseth, D. D. Corell, P. B. Poulsen, S. S. Hansen, C. Dam-Hansen : 「Museum lighting for golden artifacts, with low correlated color temperature, high color uniformity and high color rendering index, using diffusing

- color mixing of red, cyan, and white-light-emitting diodes」、Proc. SPIE、8 278、 (2012)
- (2-56) L. S. Harisson : 「An investigation of the damage hazard in spectral energy」、Illum. Engng.、49-5、pp.253-257、 (1954)
- (2-57) C. Li、M. R. Luo、C. Li and G. Cui : 「The CRI-CAM02UCS colour rendering index」、*Color Res. Appl.*、37-3、pp.160-167、 (2012)

第3章

- (3-1) 日本照明委員会 : 「博物館展示物の光放射による損傷の抑制 (CIE 157: 2004、日本語訳)」、日本照明委員会、(2005)

第4章

- (4-1) たとえば、R. W. G. Hunt : 「Light and dark adaptation and the perception of color」、*J. Opt. Soc. Am.*、42-3、pp.190-199、 (1952)
- (4-2) たとえば、P. R. Boyce、C. Cuttle : 「Effect of correlated colour temperature on the perception of interiors and colour discrimination performance」、*Light. Res. Technol.*、22-1、pp.19-36、 (1990)
- (4-3) たとえば、D. L. Loe、E. Rowlands and N. F. Watson : 「Preferred lighting conditions for the display of oil and watercolour paintings」、*Light. Res. Technol.*、14-14、pp.173-192、 (1982)
- (4-4) 芦澤昌子、池田光男 : 「生活視作業への照度レベルの影響」、色学誌、16-2、pp.9 7-104、 (1992)
- (4-5) 日本照明委員会 : 「博物館展示物の光放射による損傷の抑制 (CIE 157: 2004、日本語訳)」、日本照明委員会、(2005)
- (4-6) 矢口ら (共著) : 「眼・色・光 : より優れた色再現を求めて」、日本印刷技術協会、p.47、 (2007)
- (4-7) Publ. CIE : 「The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version), CIECAM97s (CIE 131 : 1998)」、CIE、 (1998)
- (4-8) Publ. CIE : 「A Colour Appearance Model for Colour Management Systems : CIECAM02 (CIE 159 : 2004)」、CIE、 (2004)
- (4-9) JIS Z 8781-4 : 「CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間」、日本工業規格、 (2013)

- (4-10) JIS Z 8781-5 : 「CIE 1976 $L^*u^*v^*$ 色空間及び u' , v' 均等色度図」、日本工業規格、(2013)
- (4-11) JIS Z 8113 : 1998 : 「照明用語」、日本工業規格、(1998)
- (4-12) JIS Z 8723 : 2000 : 「表面色の視感比較方法」、日本工業規格、(2000)
- (4-13) 矢口博久 : 「CIE 色の見えモデル (CIECAM02) の概要とその応用」、日本写真学会誌、68-1、pp.16-20、(2005)
- (4-14) JIS Z 8721-1993 : 色の表示方法-三属性による表示、日本工業規格、(1993)
- (4-15) 側垣博明、高浜幸太郎、納谷嘉信 : 「マンセル色票の分光反射率分布の解析」、色学誌、7-4、pp.167-174、(1983)
- (4-16) 側垣博明、高浜幸太郎、納谷嘉信 : 「マンセル色票の分光反射率分布の推定」、色学誌、13-2、pp.150-152、(1989)
- (4-17) 側垣博明、高浜幸太郎 : 「マンセル表色系における高クロマ色の分光反射率分布の推定」、照学誌、82-11、pp.902-916、(1998)
- (4-18) 湯尻照 : 「色票の色の見えの輝度レベルによる変化」、工学、18-4、pp.208-214、(1989)
- (4-19) 門馬智春、本間園乃枝、矢口博久、塩入諭、羽石秀昭、三宅洋一 : 「両眼隔壁等色による薄明視における表面色の見えの測定」、光学、22-5、pp.273-280、(1993)

第5章

- (5-1) 岩下豊彦 : 「SD 法によるイメージの測定」、川島書店、(1983)
- (5-2) 辻本明江ほか : 「照明がおよぼす配色感情に関する研究 (予備実験その 1)」、J DA Communication 日本インテリアデザイン協会誌、pp.7-11、(1981)
- (5-3) 納谷嘉信ほか : 「単色感情の分析 1 実験の計画と実施」、電子技術総合研究所彙報、36-5、pp.337-353、(1972)
- (5-4) 納谷嘉信ほか : 「単色感情の分析 2 配色感情と単色感情の対応」、電子技術総合研究所彙報、36-6、pp.415-433、(1972)
- (5-5) たとえば、納谷嘉信、辻本明江、山中俊夫、池田潤平 : 「色彩調和の一对比較法による検討 (色調和の研究その 1 予備実験)」、電気試験所彙報、29-8、pp.631-639、(1965)
- (5-6) 納谷嘉信ほか : 「三色配色の Semantic Differential 法による感情分析 (その 1 実験の計画と実施)」、電気試験所彙報、3-11、pp.1153-1168、(1967)

- (5-7) たとえば、納谷嘉信ほか：「三色配色の Semantic Differential 法による感情分析」、テレビジョン、22-6、pp.441-450、(1967)
- (5-8) 納谷嘉信ほか：「三色配色の Semantic Differential 法による感情分析（その 2 実験結果の因子分析による解析）」、電気試験所彙報、32-2、pp.195-220、(1968)
- (5-9) 納谷嘉信、橋本健次郎：「光源の演色性による明るさ感と配色の目立ち感情の関連」、照学誌、70-2、pp.55-61、(1986)
- (5-10) 橋本健次郎、納谷嘉信：「演色性の異なる照明下での配色の目立ち感情の評価と予測」、照学誌、74-2、pp.96-101、(1990)
- (5-11) 橋本健次郎、納谷嘉信：「4 色配色の目立ち感情に基づく明るさ感の評価と予測」、照学誌、74-10、pp.674-680、(1990)
- (5-12) 遠藤健治：「美術鑑賞におよぼす照明の照度と色温度の影響」、心理学研究、50-3、pp.157-160、(1979)
- (5-13) JIS Z 8723 : 2000 : 「表面色の視感比較方法」、日本工業規格、(2000)
- (5-14) D. L. Loe、E. Rowlands and N. F. Watson : 「Preferred lighting conditions for the display of oil and watercolour paintings」、*Light. Res. Technol.*、14-14、pp.173-192、(1982)
- (5-15) 日本照明委員会：「博物館展示物の光放射による損傷の抑制（CIE 157: 2004、日本語訳）」、日本照明委員会、(2005)
- (5-16) たとえば、N. Narendran、L. Deng : 「Color rendering properties of LED light sources」、Solid State Lighting II : Proceedings of SPIE 4776、pp.61-67、(2002)
- (5-17) Publ. CIE : 「A Colour Appearance Model for Colour Management Systems : CIECAM02 (CIE 159 : 2004) 」、CIE、(2004)

第 6 章

- (6-1) D. B. Judd : 「A flatness index for artificial illuminants」、*Illum. Eng.*、62、pp.593-598、(1967)
- (6-2) たとえば、K. Smet、W. R. Ryckaert、M. R. Pointer、G. Deconinck and P. H. anselaer : 「Optimal colour quality of LED clusters based on memory colours」、*Optics Express*、19-7、pp.6903-6912、(2011)
- (6-3) たとえば、R. Dangol、M. Islam、M. hyvärinen、P. Bhusal、M. Puolakka an

- d L. Halonen : 「Subjective preferences and colour quality metrics of LED light sources」 、 *Light. Res. Technol.*、 45、 pp.666-688、 (2013)
- (6-4) Publ. CIE : 「Colour Rendering of White LED Light Sources (CIE 177 : 2007) 」 、 CIE、 (2007)
- (6-5) JIS Z8105-1982 : 「色に関する用語」 、 日本工業規格、 (1982)
- (6-6) S. Jost-Boissard and M Fontoynont : 「Optimization of LED-based light blendings for object presentation」 、 *Color Res. Appl.*、 34-4、 pp.310-320、 (2009)
- (6-7) A. Liu、 A. Tuzikas、 A. Žukauskas、 R. Vaicekauskas、 P. Vitta and M. Shur : 「Cultural preferences to color quality of illumination of different artwork objects revealed by a color rendition engine」 、 *IEEE Photonics Journal*、 5-4、 6801010、 (2013)
- (6-8) S. M. Aston and H. E. Ballchamber : 「Illumination, colour rendering and visual clarity」 、 *Light. Res. Technol.*、 1-4、 pp.104-106、 (1969)
- (6-9) 乾正雄、梅千野晃 : 「住宅居間の快適性に及ぼす光源と照度の影響」 、 日本建築学会論文報告集、 298、 pp.81-87、 (1980)
- (6-10) S. Jost-Boissard and M Fontoynont and J. Blanc-Gonnet : 「Perceived lighting quality of LED sources for the presentation of fruit and vegetables」 、 *Journal of Modern Optics*、 56-13、 pp.1420-1432、 (2009)
- (6-11) 橋本健次郎 : 「光源の演色性に基づく明るさ感と目立ち感情に関する研究」 、 博士学位論文、 (1993)
- (6-12) P. R. Boyce : 「Investigation of the subjective balance between illuminance and lamp colour properties」 、 *Light. Res. Technol.*、 9-1、 pp. 11-24、 (1977)
- (6-13) 金谷末子、吉瀬英雄 : 「光源の色温度・演色性が室内の所要照度に及ぼす影響」 、 *National Tech. Rep.*、 23-4、 pp.584-594、 (1977)
- (6-14) W. A. Thornton and E. Chen : 「What's is visual clarity?」 、 *J. Illum. Engng. Soc.*、 7-2、 pp. 85-94、 (1978)
- (6-15) 刈田隆義ほか「3波長帯形けい光ランプの照明効果」 、 照学誌、 65-10、 pp.526-533、 (1981)
- (6-16) 納谷嘉信、橋本健次郎 : 「高演色性蛍光ランプの照明下での明るさ感」 、 照学誌、 67-6、 pp. 260-265、 (1983)

- (6-17) J. A. Worthey : 「Visual Clarity with a black-and-white scene」、J. of IES、14-2、pp.643-648、 (1985)
- (6-18) 湯尻照 : 「照度レベルと光源の演色性の違いによる物体色の明るさ感」、照学誌、72-2、pp.69-73、 (1988)
- (6-19) 占部有紀、岩井彌、坂口敏彦 : 「光源の色温度が室内空間の明るさ感に与える影響」、電気関西支部連、 (1995)
- (6-20) 納谷嘉信、橋本健次郎 : 「光源の演色性による明るさ感と配色の目立ち感情の関連」、照学誌、70-2、pp.55-61、 (1986)
- (6-21) W. A. Thornton : 「The high visual efficiency of prime color lamps」、Lighting Design & Application、5-11、pp.35-41、 (1975)
- (6-22) R. S. Berns : 「Designing white-light LED lighting for the display of art: A feasibility study」、*Color Res. Appl.*、36-5、pp.324-334、 (2011)
- (6-23) 納谷嘉信ほか : 「三色配色の Semantic Differential 法による感情分析」、テレビジョン、22-6、pp.441-450、 (1967)
- (6-24) 辻本明江ほか : 「照明がおよぼす配色感情に関する研究 (予備実験その 1)」、J DA Communication 日本インテリアデザイン協会誌、pp.7-11、 (1981)
- (6-25) Publ. CIE : 「A Colour Appearance Model for Colour Management Systems : CIECAM02 (CIE 159 : 2004)」、CIE、 (2004)
- (6-26) M. R. Luo : 「A review of chromatic adaptation transform」、Rev Progress Coloration 2000、30-1、pp.77-92、 (2000)
- (6-27) C. Liu、M. R. Luo、C. Li and G. Cui : 「The CRI-CAM02UCS colour rendering index」、*Color Res. Appl.*、37-3、pp.160-167、 (2012)
- (6-28) M. R. Luo、G. Gui and C.J. Li : 「Uniform colour space based on CIECAM02 colour appearance model」、*Color Res. Appl.*、31-4、pp.320-330、 (2006)
- (6-29) K. A. G. Smet、J. Schanda、L. Whitehead、M. R. Luo : 「TC1-69 report The CRI2012 Colour」
- (6-30) 橋本健次郎、矢野正、納谷嘉信 : 「目立ち指数の実用化式の提案」、照学誌、84-11、pp.843-850、 (2000)

第7章

- (7-1) C. B. Holmes and J. A. Buchanan : 「Color preference as a function of the

- object described」、Bull Psychon Soc、22-5、pp.423-425、(1984)
- (7-2) K. B. Schloss、E. D. Strauss、S. E. palmer : 「Object color preference」、*Color Res. Appl.*、38-6、(2013)
- (7-3) S. Jost-Boissard and M Fontoynt : 「Optimization of LED-based light blendings for object presentation」、*Color Res. Appl.*、34-4、pp.310-320、(2009)
- (7-4) A. Liu、A. Tuzikas、A. Žukauskas、R. Vaicekauskas、P. Vitta and M. Shur : 「Cultural preferences to color quality of illumination of different artwork objects revealed by a color rendition engine」、IEEE Photonics Journal、5-4、6801010、(2013)
- (7-5) 神部尚武、金子直礼 : 「光源の演色性における好みの要因」、東芝レビュー、25-10、pp.1228-1231、(1970)
- (7-6) 乾正雄、梅千野晃 : 「住宅居間の快適性に及ぼす光源と照度の影響」、日本建築学会論文報告集、298、pp.81-87、(1980)
- (7-7) 橋本健次郎、納谷嘉信 : 「演色性の異なる照明下での配色の目立ち感情の評価と予測」、照学誌、74-2、pp.96-101、(1990)
- (7-8) M. S. Rea and J. P. Freyssinier-Nova : 「Color rendering : A tale of two metrics」、*Color Res. Appl.*、33-3、pp.192-202、(2008)
- (7-9) S. Jost-Boissard and M Fontoynt and J. Blanc-Gonnet : 「Perceived lighting quality of LED sources for the presentation of fruit and vegetables」、Journal of Modern Optics、56-13、pp.1420-1432、(2009)
- (7-10) M. S. Rea and J. P. Freyssinier : 「Color rendering : Beyond pride and prejudice」、*Color Res. Appl.*、35-6、pp.401-409、(2010)
- (7-11) W. Nakashima、S. Sunaga、T. Seno and N. Oi : 「Investigation of spectral power distributions of LED light sources to provide colour of natural objects」、AIC2013-12th International AIC congress、pp.655-658、(2013)
- (7-12) M. Wei、K. W. Houser、G. R. Allen and W. W. Beers : 「Color Preference under LEDs with Diminished Yellow Emission」、LEUKOS、10-3、pp.119-131、(2014)
- (7-13) M. Wei、K. W. Houser、A. David and M. R. Krames : 「Perceptual responses to LED illumination with colour rendering indices of 85 and 97」、*Light*.

- Res. Technol.*, 10.1177/1477153514548089, (2014)
- (7-14) F. Viénot, G. Coron and B. Lavédrine : 「LEDs as a tool to enhance faded colours of museums artefacts」, *J. Cult. Herit.*, 12-4, pp.431-440, (2011)
- (7-15) J. A. Veitch, L. A. Whitehead, M. Mossman and T. D. Pilditch : 「Chromaticity-Matched but spectrally different light sources effects on simple and complex color judgments」, *Color Res. Appl.*, 39-3, pp.263-274, (2014)
- (7-16) 芦澤昌子、池田光男 : 「色の目立ちの面積効果」, 色学誌, 18-3, pp.200-204, (1994)
- (7-17) 須長正治、山下由己男 : 「カラー画像における色の目立ちの要因」, 色学誌, 27-4, pp.285-297, (2003)
- (7-18) B. H. Marshall and J. P. Guilford : 「VIII. The dependence of hue, tint and chroma upon area」, *The American Journal of Psychology*, 46-3, pp.465-469, (1934)
- (7-19) JIS Z 8726-1975 : 「光源の演色性評価方法」, 日本工業規格, (1975)
- (7-20) Publ. CIE : 「A Colour Appearance Model for Colour Management Systems : CIECAM02 (CIE 159 : 2004)」, CIE, (2004)
- (7-21) 神作博、福本純一 : 「安全色彩の誘目性について」, 色学誌, 1-1, pp.4-14, (1972)
- (7-22) 角野正夫 : 「蛍光ランプの色の基礎的考察」, 日立評論、別冊第 17 号, pp.62-70, (1956)
- (7-23) 芦澤昌子、池田光男 : 「色の目立ちの照度レベルによる変化--プルキンエ移行の影響」, 照学誌, 71-10, pp.612-617, (1987)
- (7-24) 芦澤昌子、池田光男 : 「色の目立ちの照度レベルによる変化--実験式の導出」, 照学誌, 72-2, pp.79-84, (1988)
- (7-25) 芦澤昌子、池田光男 : 「全照度レベルにわたって目立つ 2 色配色」, 照学誌, 73-10, pp.649-653, (1989)

第 8 章

- (8-1) Publ. CIE : 「A Colour Appearance Model for Colour Management Systems : CIECAM02 (CIE 159 : 2004)」, CIE, (2004)
- (8-2) 矢口博久 : 「CIE 色の見えモデル (CIECAM02) の概要とその応用」, 日本写真学

- 会誌、68-1、pp.16-20、(2005)
- (8-3) S. Jost-Boissard and M. Fontoynt and J. Blanc-Gonnet : 「Perceived lighting quality of LED sources for the presentation of fruit and vegetables」 、 *Journal of Modern Optics*、56-13、pp.1420-1432、(2009)
- (8-4) M. S. Rea and J. P. Freyssinier : 「Color rendering : Beyond pride and prejudice」 、 *Color Res. Appl.*、35-6、pp.401-409、(2010)
- (8-5) 芦澤昌子、池田光男 : 「色の目立ちの面積効果」 、 *色学誌*、18-3、pp.200-204、(1994)
- (8-6) 神作博、福本純一 : 「安全色彩の誘目性について」 、 *色学誌*、1-1、pp.4-14、(1972)

第9章

- (9-1) R. S. Berns : 「A Color Target for Museum Applications」 、 18th Color Imaging Conference Final Program and Proceedings、pp.27-32、(2010)
- (9-2) R. S. Berns : 「Designing white-light LED lighting for the display of art: A feasibility study」 、 *Color Res. Appl.*、36-5、pp.324-334、(2011)
- (9-3) F. Viénot、G. Coron and B. Lavédrine : 「LEDs as a tool to enhance faded colours of museums artefacts」 、 *J. Cult. Herit.*、12-4、pp.431-440、(2011)
- (9-4) A. Thorseth、D. D. Corell、P. B. Poulsen、S. S. Hansen、C. Dam-Hansen : 「Museum lighting for golden artifacts, with low correlated color temperature, high color uniformity and high color rendering index, using diffusing color mixing of red, cyan, and white-light-emitting diodes」 、 *Proc. SPIE*、8278、(2012)
- (9-5) N. Yoshizawa、T. Fujiwara and T. Miyashita : 「A study on the appearance of paintings in the museum under violet and blue LED」 、 *Proceedings of CIE2013、CIEx038 : 2013*、pp.374-381、(2013)
- (9-6) X. Mou、R. S. Berns : 「Design of LED for museum lighting application」 、 *Proceedings of CIE2013、CIEx038 : 2013*、pp.758-766、(2013)
- (9-7) A. Liu、A. Tuzikas、A. Žukauskas、R. Vaicekauskas、P. Vitta and M. Shur : 「Cultural preferences to color quality of illumination of different artwork objects revealed by a color rendition engine」 、 *IEEE Photonics Journal*、5-

- 4、6801010、 (2013)
- (9-8) J. Schanda、P. Csuti and F. Szabó : 「Colour fidelity for picture gallery illumination, Part 1: Determining the optimum light-emitting diode spectrum」、*Light. Res. Technol.*、doi : 10.1177/1477153514538643、 (2014)
- (9-9) W. A. Thornton : 「The high visual efficiency of prime color lamps」、*Lighting Design & Application*、5-11、pp.35-41、 (1975)
- (9-10) S. Soltic and A. N. Chalmers : 「Differential evolution for the optimisation of multi-band white LED light sources」、*Light. Res. Technol.*、44、pp.224-237、 (2012)
- (9-11) M. S. Islam、R. Dangol、M. hyvärinen、P. Bhusal、M. Puolakka and L. Halonen : 「User preferences for LED lighting in terms of light spectrum」、*Light. Res. Technol.*、45、pp.641-665、 (2013)
- (9-12) JIS Z 9112 : 2012 : 「蛍光ランプ・LED の光源色及び演色性による区分」、日本工業規格、 (2012)
- (9-13) 神庭信幸 : 「博物館展示照明が色材料に及ぼす作用効果」、*照学誌*、74-4、pp.191-196、 (1990)
- (9-14) L. S. Harisson : 「An investigation of the damage hazard in spectral energy」、*Illum. Engng.*、49-5、pp.253-257、 (1954)

業績

■ 論文（査読あり）：5 編

中島由貴、湊田隆義（照明学会誌、2014 年 2 月号）

美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究～色の忠実性に基づく演色性評価方法と照度との関係～

中島由貴、湊田隆義（女子美術大学研究紀要 2014 年第 44 号、2014 年 3 月発行）

美術館・博物館の最適視環境に対する照明の影響に関する色彩科学的考察

中島由貴、湊田隆義（照明学会誌、2015 年 2 月号）

美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究（2）～低照度下における色彩印象に対する赤色の影響～

中島由貴、湊田隆義（女子美術大学研究紀要 2015 年第 45 号）

美術館・博物館の最適な照明・色彩環境の研究～低照度下の色の見えに対する色相の影響～

中島由貴、湊田隆義（2015 年 5 月号）

美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究（3）～照度効果を付加した演色性評価方法の開発～

■ 国外発表：2 編

Yuki NAKAJIMA、Takayoshi FUCHIDA：Affective evaluation on color samples illuminated by LED illumination ～influence of illuminance level、*Proceedings of CIE2013*、CIEx038：2013、2013

Yuki NAKAJIMA、Takayoshi FUCHIDA：Development of a new calculation method of color rendition taking illuminance into consideration、*Proceedings of CIE2014*、CIEx039：2014、2014

■ 国内発表：12 編

中島由貴、加倉井美里、湊田隆義：LED 照明下における色の見えの変化～照度による影響（その 1：予備的実験）～、平成 24 年度（第 45 回）照明学会全国大会、2012

中島由貴、湊田隆義：美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究～異なる照明環境下における箔の測色的解析～、日本色彩学会測色研究会 2012 年研究発表論文集、2012

中島由貴、湊田隆義：LED 照明下における色の見えの変化～照度の影響、照明学会第 11 回ヤングウェーブフォーラム、2013

中島由貴、湊田隆義：美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究～異なる照明環境下における画材の演色特性～、日本色彩学会第 44 回全国大会、2013

中島由貴、湊田隆義：美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究～照度を考慮した新しい演色評価方法の開発～、平成 25 年度（第 46 回）照明学会全国大会、2013

中島由貴、湊田隆義：絵画を含む多色配色の色彩感情に対する照明の影響～分光分布及び照度との関係～、日本色彩学会画像色彩研究会 2013 年度研究発表会論文集、2013

中島由貴、湊田隆義：美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究～日本画の色の見えと照度の関係～、平成 25 年度（第 37 回）照明学会東京支部大会、2013

中島由貴、湊田隆義：異なる照明条件下における日本画の色の見え・色相と面積の影響、日本色彩学会第 45 回全国大会、2014

中島由貴、湊田隆義：低照度下の絵画鑑賞に適した LED 照明の分光分布設計、日本色彩学会第 45 回全国大会、2014

中島由貴、湊田隆義：美術作品の保存及び色の見えを考慮した最適な LED 照明の研究、文化財保存修復学会第 36 回大会、2014

中島由貴、湊田隆義：美術館展示照明の照度効果に基づいた演色性評価方法の検討、平成 26 年度（第 47 回）照明学会全国大会、2014

中島由貴：美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究、第 67 回千葉視覚研究会、2014

謝辞

本論文の執筆に際し、女子美術大学大学院瀧田隆義先生、女子美術大学坂田勝亮先生、千葉大学大学院矢口博久先生から懇切で熱心なご指導を賜りました。

瀧田先生には大学院博士後期課程入学当初からこれまで、色彩学の基礎にはじまり研究に必要なさまざまな知識、姿勢に至るまで、終始懇切丁寧なご指導を賜りました。先生の下でなければこの博士論文をまとめることはできませんでした。心から厚く感謝申し上げます。

坂田先生には大学院入学当初から色彩学に関するご指導を賜り、ご多忙の中、論文をご審査いただきました。

矢口先生にはご多忙の中、論文をご審査いただき、有益なご助言とご鞭撻を賜りました。主査、副査の先生方に深く御礼いたします。

橋本健次郎氏には研究スタート時から本研究に関するさまざまな知識、実験計画など多くのご助言を賜りました。ここに心から御礼申し上げます。

女子美術大学大学院入学時よりご指導いただきました故近江源太郎先生、側垣博明先生、高橋晋也先生、故小林光夫先生、大関徹先生、内川恵二先生に感謝いたします。

日頃からご助言をいただきました千葉大学大学院溝上陽子先生、一般財団法人日本色彩研究所小松原仁氏、小林信治氏、株式会社東芝今井良枝氏に厚く御礼申し上げます。また学会や研究会にてご助言いただきました皆さまに感謝いたします。

実験機材及びサンプルなどをご提供して下さった一般財団法人日本色彩研究所、多大なご支援をいただいた東芝ライテック株式会社、測定器などご協力いただいたコニカミノルタ株式会社に感謝の意を表します。

そして、私に楽しい学生生活をくださった色彩学研究室の先輩、在学生の皆さん、李侖珍さん、辛恩僖さん、李ジュヒョンさん、加倉井美里さん、施薇さん、呉承美さん、何水蘭さん、宮坂真紀子さん、韓惠軫さん、王冬冬さん、畠山里枝さんに感謝いたします。また実験の被験者としてご協力いただいた女子美術大学の学部生、院生の皆さんに感謝いたします。

最後に、常に精神的な支えとなってくれた両親、弟達に感謝します。両親には大学院入学から5年間、すべての面で支えてもらいました。大学院に進学させてくれたこと、心より感謝します。ありがとうございました。