

博士論文

LEDを用いた照明環境の視覚的影響に関する研究

国立大学法人 宇都宮大学大学院
工学研究科 システム創成工学専攻
久保 千穂

目 次

1 序 論

1.1 本研究の背景

1.1.1 照明市場におけるLED照明の動向・・・・・・・・・・・・・・・・6

1.1.2 照明用LEDに求められる品質・・・・・・・・・・・・・・・・8

1.1.3 照明品質に関するLEDの特徴・・・・・・・・・・・・・・・・9

1.2 研究の目的と概要・・・・・・・・・・・・・・・・12

2 視認性（可読性，目立ち，色弁別性）に対する影響

2.1 本章のはじめに・・・・・・・・・・・・・・・・15

2.2 白黒文字に対する可読性への相関色温度の影響・・・・・・・・16

2.3 色文字に対する可読性への光源による分光スペクトルの違いの影響・・31

2.4 色の目立ちに対する相関色温度の影響・・・・・・・・51

2.5 色弁別性に対する分光分布、相関色温度の影響・・・・・・・・62

2.6 本章のまとめ

3 対象物の見えに対する影響

3.1 見えを良くするための分光分布についての研究・・・・・・・・97

3.2 美味しそうに見せるための分光設計へのアプローチ

3.3 本章のまとめ

4 心理的，生理的影響に対する影響

4.1 色温度と照度による快適性

4.2 眼疲労への分光分布の影響

4.3 本章のまとめ

5 総合的考察

6 総括

参考文献

謝辞・本研究に関する発表論文等

1 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 照明市場におけるLED照明の動向

照明市場においてLEDの普及が急速に進んでいる。地球温暖化による環境への影響が懸念され、政府は京都議定書(1997)において2008年から2012年の5年間でCO₂排出量マイナス6%の目標を掲げた。政府の目標達成計画(チームマイナス6%)の中で経済産業省及び環境省は対策の一つとして、高効率照明(LED照明)の普及を促し、産業界もそれに応える形でLED電球の開発、販売を進めてきた。その動きは洞爺湖サミット(2008)以降白熱電球全廃の方針が示され、自治体の補助金政策などによって一般家庭への普及もさらに加速している。図1.1にLEDを取り巻く環境の変化と適用の広がりについて示した。加えてその後の東日本大震災(2011)による電力事情の悪化から日本では、当初の市場予測を超えて急速にLED化が進んでいる(図1.2)。

開発努力により、LEDの効率は図1.3のように急激に向上し、現在は蛍光灯と同レベルの高さまで及んでいる。それに伴い、当初の主流であったLED電球に加え、商店、オフィスにおける直管型蛍光灯のLED置き換えが進んでおり、大光量、特殊領域にも適用の広がりがすすんでいる。

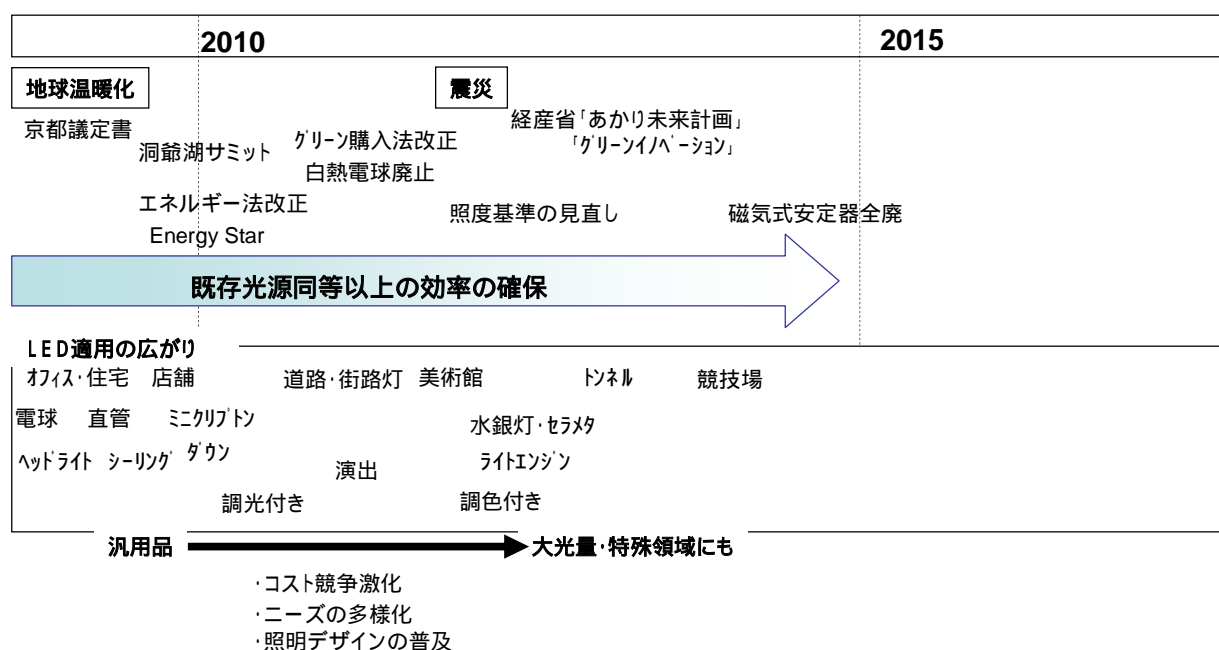


図 1.1 照明用LEDを取り巻く環境と適用の広がり

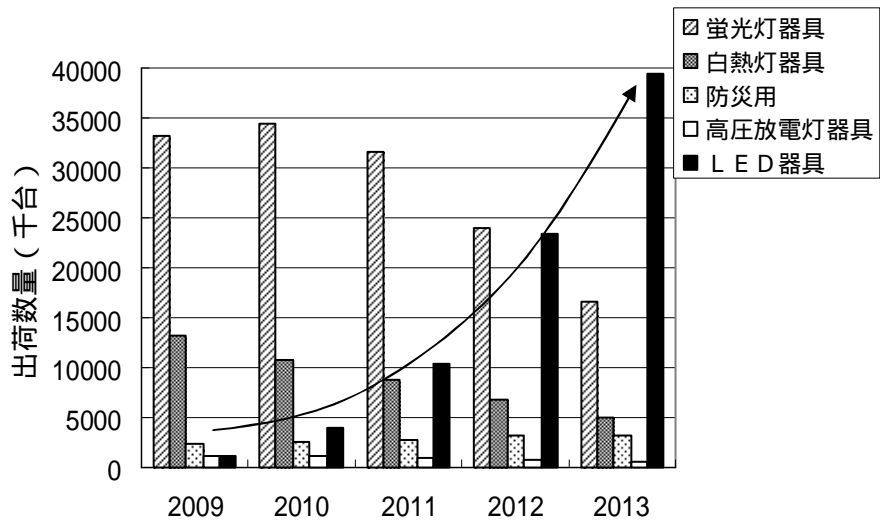


図 1.2 照明器具の年度別出荷量

社)日本照明工業会自主統計データより作成

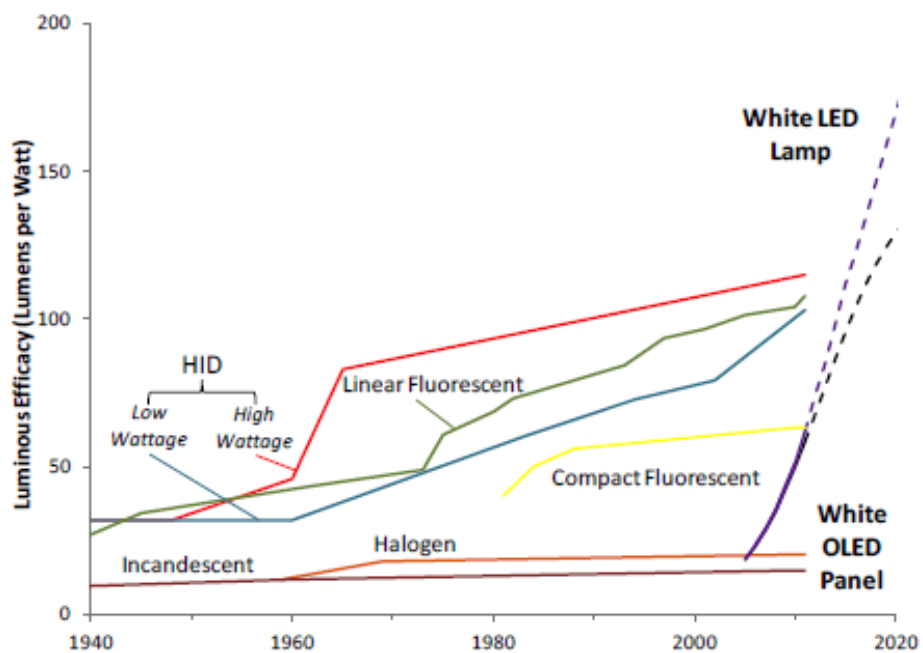


図 1.3 白色光源の効率ロードマップ

DOE Multi Year Program Plan(2012)より

当初課題であった既存光源の置き換えにおける効率の課題が解決するに従い、LEDへの要求が高効率化から照明の質へ移りつつある。既存光源から同じ光束を持つLEDに置き換えたときに配光や分光分布、電源方式の違いから見え方などが大きく異なることが課題となったためである。LEDに対し、明るさ以外の照明品質に対するニーズが高まってきている。

1.1.2 照明用LEDに求められる照明品質

照明品質とは照明下での生活が快適に行うことができるかということである。照明品質には図1.4のように3つの品質があり、主に照明下での視作業などの「機能性」と被照明物に対する「見えの良さ」、加えて照明下で安全・快適な生活ができるかの「心理的・生理的影響」がある。これらに対してLEDがその特徴によって既存光源に対してより高い照明品質が得られるよう設計を行うことが求められている。

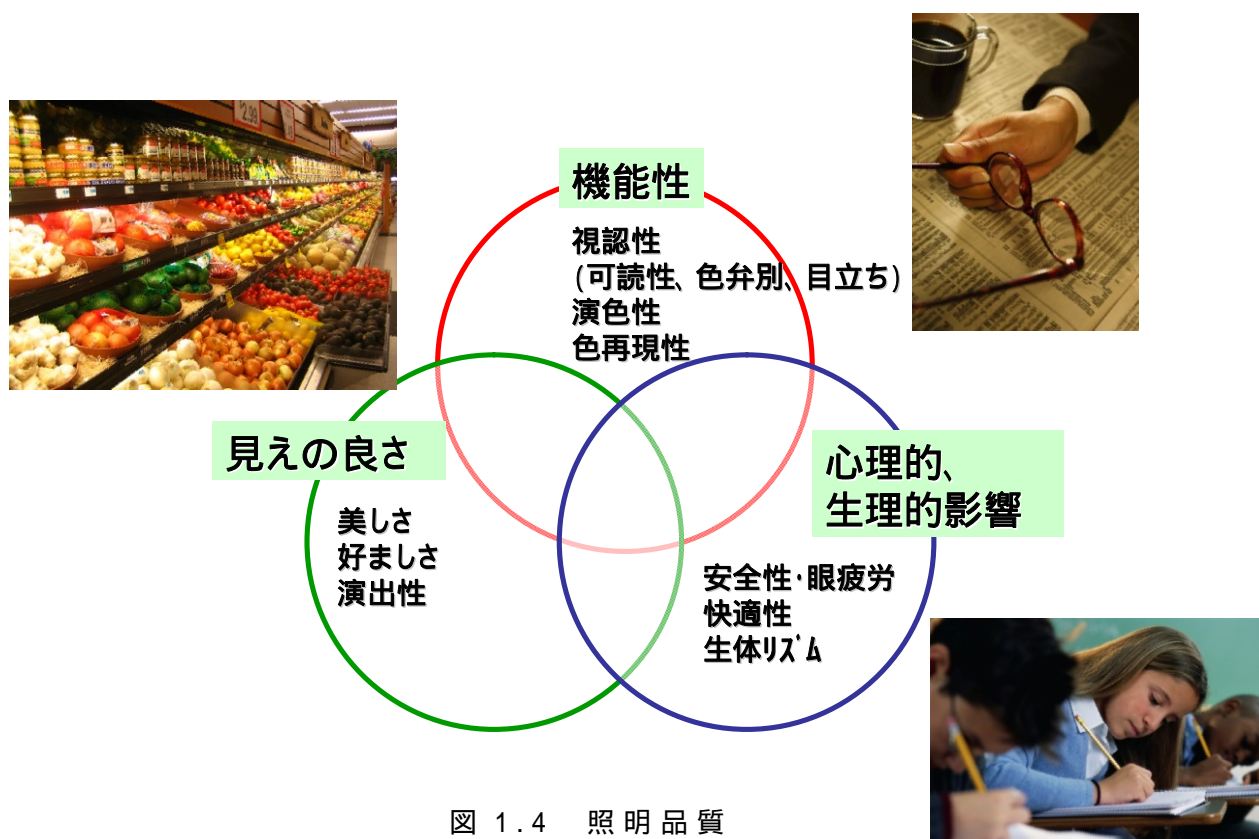


図 1.4 照明品質

1.1.3 照明品質に係るLEDの特徴

本論文においては屋内生活における生活照明に使われる従来光源とLEDを取り上げて論ずる。そのため、ここで白熱電球と蛍光灯に対してLEDの特徴を述べる。光源による照明品質の違いについては、様々な先行研究があるが、以下のような光源の持つ特徴の違いが引き起こすものであり、どういった特徴が視覚的影響を与えるかを明確にする必要がある。

1) 相関色温度

相関色温度はJISZ8113に定義されている通り、光の色を知覚的に最も近似する黒体の温度で表すものである。照明の相関色温度の違いはその環境下での雰囲気だけでなく、視認性や色の見え、快適性に影響を与える事例が報告されている¹⁾²⁾³⁾。

また、色温度が高い照明は睡眠を促すホルモン物質であるメラトニンの抑制作用が高いことがわかっており、生活リズムに照明の相関色温度が影響する可能性がある⁴⁾。

色温度がほとんど決まっている白熱電球に対し、蛍光体で発光色を作り出す蛍光灯やLEDは製品の相関色温度にバリエーションがある。さらにLEDには蛍光灯置き換えのために蛍光灯に相当するラインナップが準備されるとともに混色によって、自由に相関色温度や発光色を調色させることができる製品がすでに市販化されている。表1.1に一般照明用として主に販売されている光源ごとの相関色温度を示す。

表 1.1 市販照明器具による照明の代表的相関色温度

光源	白熱電球	蛍光灯	LED
設定色温度	2400 ~ 3000K	電球色 3000K 温白色 3500K 白 色 4000K 昼白色 5000K 昼光色 6000K	蛍光灯相当 電球色 ~ 昼光色まで可変

2) 配光

配光により，被照明物の見え方は大きく影響を受ける．LEDのような指向性の強い光は素材の光沢や陰影を強調したり，食品の油分のてりを見せ，おいしそうに見せるなどの効果がある一方，全般照明として使用すると天井が暗くなり部屋の明るさ感が保てない場合がある．蛍光灯は拡散性の強い光を出すため，陰影や，食品のてりは出しにくいですが，部屋全体を均一に照明することができ，部屋の明るさ感を保つことができる．

3) 分光分布

光源の種類によって分光分布が大きく異なる．同じ光源の種類でも蛍光灯やLEDは発光方式や蛍光体の種類で分光分布は異なる．たとえ相関色温度が同じであってもそれぞれの光源による分光分布の違いから，被照明物の分光反射率が異なり，見え方に影響する．図1.5に光源が異なる電球色の市販電球の分光分布例を示す．これらの電球の色度は図1.6に示したように，同じ電球色の範囲に入っており，光色はほとんど同じでも分光分布が大きく異なることがあるということがわかる．一見した光の色が同じでも光源の選択によって被照明物の見え方が異なることに注意が必要である．

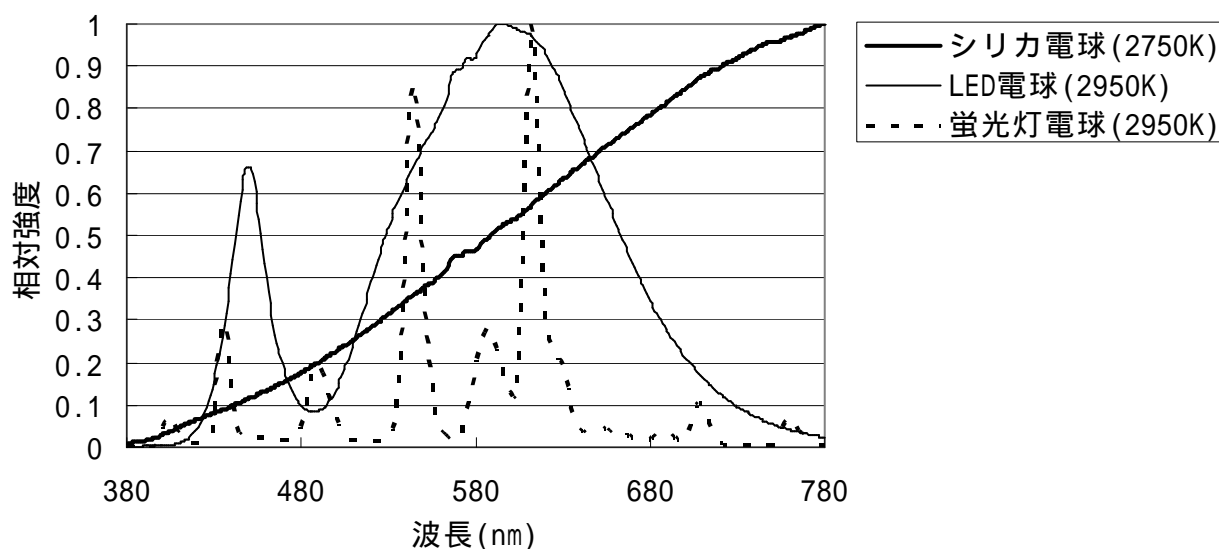


図 1.5 市販電球の分光分布例（電球色）

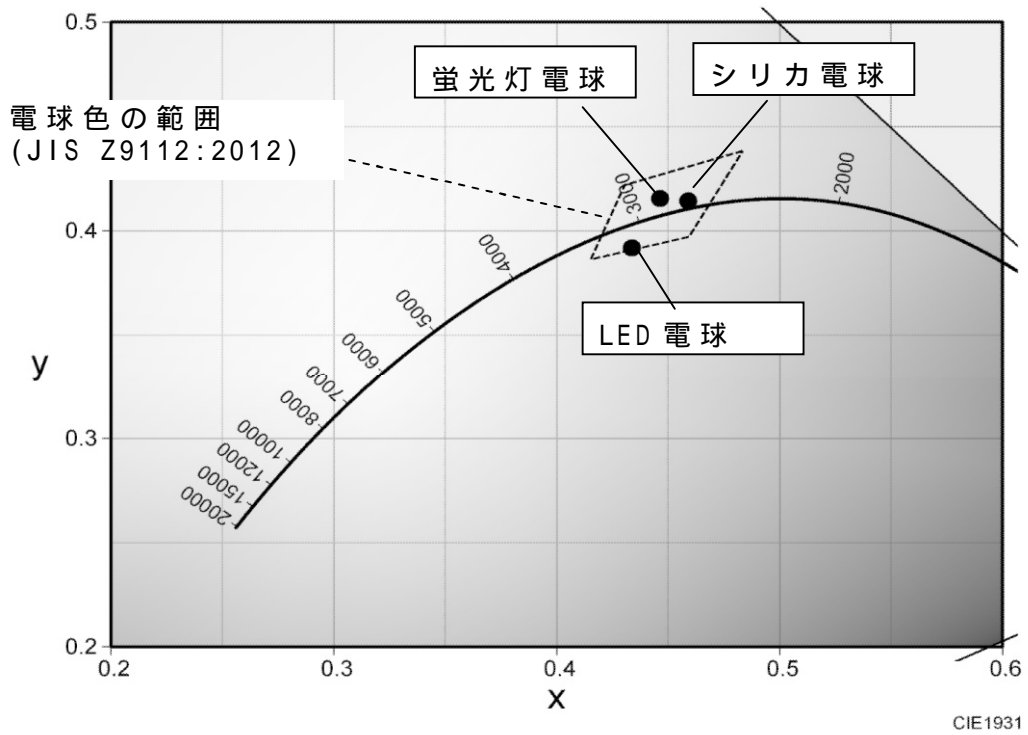


図 1.6 電球の色度

1.2 研究の目的と概要

本研究では生活空間における照明品質の確保と向上をめざして、LEDを照明に適用した場合にLEDの特性が視覚に与える影響を明確にすることを目的とした。LEDの特性として主に光色（相関色温度）と分光分布に着目した。研究手段として、LEDと従来光源を使い、なるべく実際の使用環境にそった環境下で被験者を使った実験を行うことによって、影響する要因を解明しようと試みた。

第2章ではLED照明が視覚的タスクである「視認性」に与える影響を、可読性と色の目立ち、色弁別を対象に取り上げた。特に高齢者においては、視機能の低下による見やすさへの影響が大きく懸念されるため、照明の要因の影響が加齢によってどんな変化をするのかについて年齢の異なる被験者を対象に研究を行った。加齢による水晶体の黄変化や感度の低下によると考えられる加齢による見え方の変化が認められ、高齢者に優しい空間作りのためには照明の色温度や分光分布に気を配った設計が効果的であることを明確にした。

第3章では対象物の見えの良さに対する影響として、人の肌の見えと食べ物が見えそうに見えるかについて研究を行った。

実験の結果、人間には微妙な分光分布の調整による見えの違いが感じられることが明確になったことから、照明の分光設計は対象物の見えに対して効果があることが確認できた。また、LEDの分光設計によって見え方を最適にするための手段について検討を行った。分光分布の違いと見た目の相関を求めることで、分光設計の方向性を示しうることを確認した。

第4章では心理的な快適性に対する相関色温度と照度との関係について、また、生理的な影響として眼の疲労と快適性について取り上げた。空間の快適性については、照明の明るさと相関色温度の組み合わせにより、異なることは経験的にも明らかであるが、その空間の使われ方（シチュエーション）によって快適な範囲が異なることが明確になった。LEDは調光調色が容易に行えることから自由度の高い調光器具が発売されており、それらを有効活用して快適環境を得るための参考データとなりうると考える。眼の疲労は様々な症状として表れるが、学校やオフィスなどで長時間視作業を続けた場合に症状として現れる焦点調節力の低下には、照明条件が影響を与えること

が明確となった。照明の分光分布の幅が広いほうが疲労が少なく，LEDの分光設計によって，生理的な影響もある程度コントロールできる可能性を示した。

第5章では総合的考察として論文全体を通しての考察を記載した。照明の光の相関色温度が，可読性や色の見え方や空間自体の快適性に大きく影響することを明確にし，その中でも特に高齢者には影響が大きいことから，使用する空間の使い方を考慮した最適な照明の設計によって，より快適な生活空間をつくることのできる考えを示した。また相関色温度が同じであっても分光分布の違いに起因する視覚的影響が照明品質に影響していることから，LEDの分光設計によって光の質を向上させ，更に快適な空間をつくりだせる可能性を示した。

第6章では総括として本論文で明らかにした知見をまとめて記載するとともに課題について記載した。本論文ではLEDの一般照明に対する適用において，様々なシチュエーションでの視覚的影響について最も大きく懸念される事柄に対し，研究を行い，それぞれにおいて最適な仕様をLEDで再現できる可能性を示した。照明品質は光源の違いそのものよりも，最適な分光分布や相関色温度（光色）の設定によって実現できることを示し，得られた結果はより良い環境をつくるためのLEDの仕様設計に役立つと考えている。

課題として，生活行為は多岐にわたっており，また時代によって生活スタイルは変化していく。今回実験できなかったシチュエーションはまだ多く存在し，今後も研究対象として取り組んでいく必要がある。その一方，製品仕様として個々の最適仕様に対応することは事業的には困難を伴い，一般性のある仕様に対する研究も並行して行うことが必要であると考えられる。

2 視認性（可読性，目立ち，色弁別性）に対する影響

2.1 本章のはじめに

照明下といっても場所によって行われる視作業は様々である．視作業において重要な機能的品質を表 2.1 に示す．

表 2.1 場所ごとの照明に求められる機能性

場所	視作業	機能的品質	人の要因
オフィス 学校 住宅	文書面作業 パソコン作業 読書 可読性	可読性	年齢 視力 性別 色覚特性
工場	検査作業	色弁別性	
		色再現性	
		形状認識性	
店舗	商品選択 商品展示	パッケージ可読性	
		演色性	
		質感表現性	
車	対象探索	視認性	

文字を読む作業は生活上非常に頻度の高い視作業である．文字の読みやすさを可読性といい，可読性には照明の影響が大きい．特に環境の明るさが最も大きく影響する⁵⁾．しかし同じ明るさであっても照明色などの特性が読みやすさに影響を与えることが考えられる．しかもその影響は視作業を行う人間の視覚的特性によって作用の仕方が異なる可能性がある．特に加齢による明るさや色に対する視覚の変化は影響が大きいことが考えられる．また，色の視認性や色の見わけやすさ（弁別性）についても，照明の特性によって見かけの色が変わってしまうことで影響を受けることが考えられる．

本章では照明色や分光分布が生活上の視作業性に与える影響を加齢による視覚変化の影響も踏まえて研究した．

2.2 白黒文字に対する可読性への LED の相関色温度の影響

2.2.1 目的

照明設計においては視作業性に対し照度管理が最も需要であり，読書においては文字と背景の輝度コントラストが視認性の主要因である．しかしながら実際の感覚として照明色の違いによって，同じ照度や輝度コントラストでも見やすさが異なる．

また，相関色温度（以下色温度とする）の違いにより，文書面の明るさ感が異なる報告があり¹⁾，明るさ感の違いが視認性に影響を与える可能性もある．

LED 照明は出力制御の容易さから，色温度が変化する照明器具もあり，色温度が異なる場合の照明下での視作業性を明確にすることは重要である．

さらに加齢の影響として高齢者においてはコントラスト感度の低下が見られるが，水晶体の黄変化による短波長側の感度低下があることから⁶⁾，照明の分光スペクトルの違いが視認性に影響を与える可能性がある．

本研究では LED 照明を対象とし，色温度の違いによる視作業性の比較を行った．

また，色温度が同じでも分光分布が異なる場合における影響をみるため，同じ色温度条件で分光スペクトルの異なる照明での実験結果を比較した．

加齢に対応した照明提案に向けて，設計仕様による視特性の加齢による変化を明確にすることを目的とした．読書時の照明を想定し，設計仕様のうち色温度に着目して，若齢者から高齢者の可読性の比較実験を行った．

さらに同じ色温度でも分光スペクトルの違いによる視認性の違いをみるため，LED の色温度変換方法が異なる場合についても実験を行い比較した．

2.2.2 実験方法

2.2.2.1 実験照明

明らかに光色の違いがわかる低色温度 (2700K)，昼白色 (5000K)，高色温度 (8800K) の色温度条件 3 水準の照明で実験を行った．

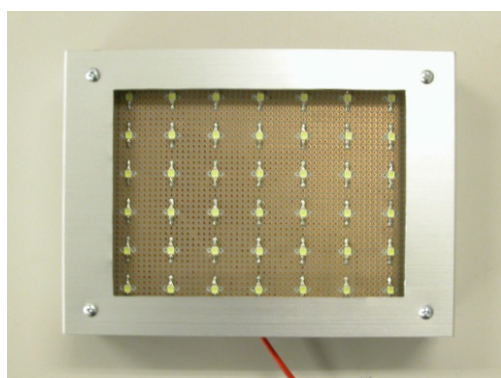
分光スペクトルの違いによる比較を行うため，パターンとしてフィルタを使った場合 と異なる色温度の LED を混色した場合 で行い，それぞれの結果を比較することとした．表 2.2 に照明パターンにおける色変換方法と使

用 LED を示す。9300K の LED を使用した場合は器具反射などで使用 LED よりも照明の色温度は低下した。照明条件の測定は実際観察する文書面となる机上でを行い，TOPCON BM-5A を用い標準反射板 WS-3 上の反射光を測定した。

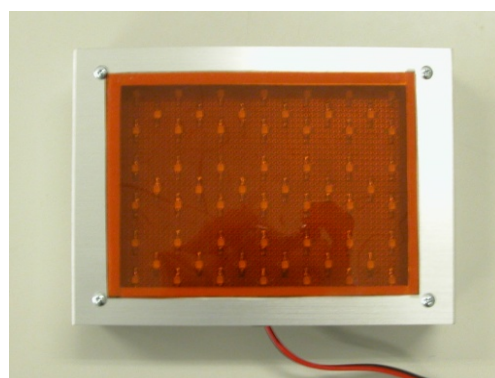
表 2.2 照明パターン の使用 LED と色温度変換方法

照明色温度		2700K	5000K	8800K
使用 LED と色温度 変換方式		9300K LED + フィルタ	9300K LED + フィルタ	9300K LED
		2700K LED	2700K LED + 9300K LED	9300K LED

フィルタは色温度変換フィルタ（東芝ライテック コンバージョンフィルタ）を使用した。照明部分の写真を図 2.1 に示す。



フィルタ無



フィルタ有

図 2.1 実験に使用した照明部の写真

それぞれの色温度変換方法における分光スペクトルを図 2.2，図 2.3 および図 2.4 に示す。

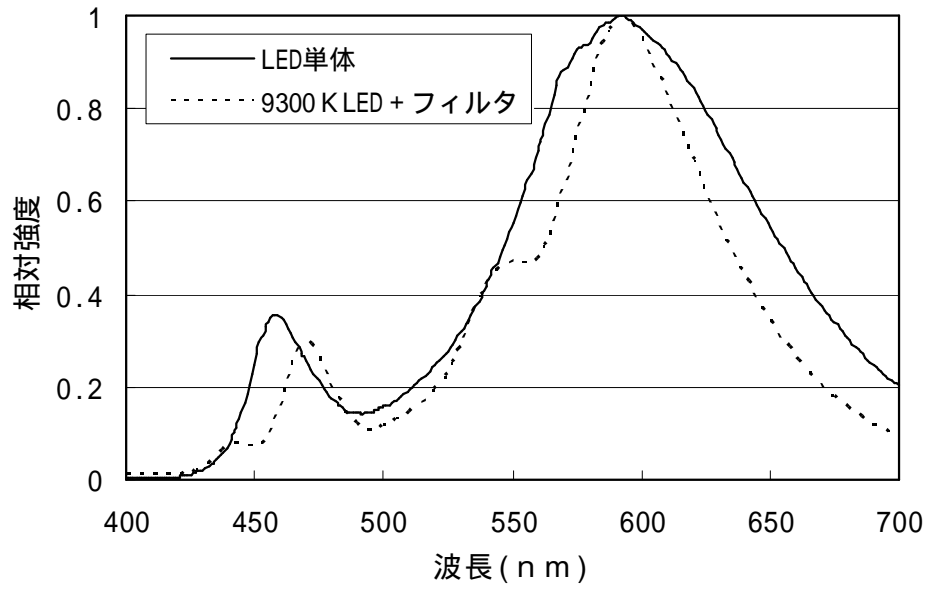


図 2.2 2700K 照明の分光スペクトル

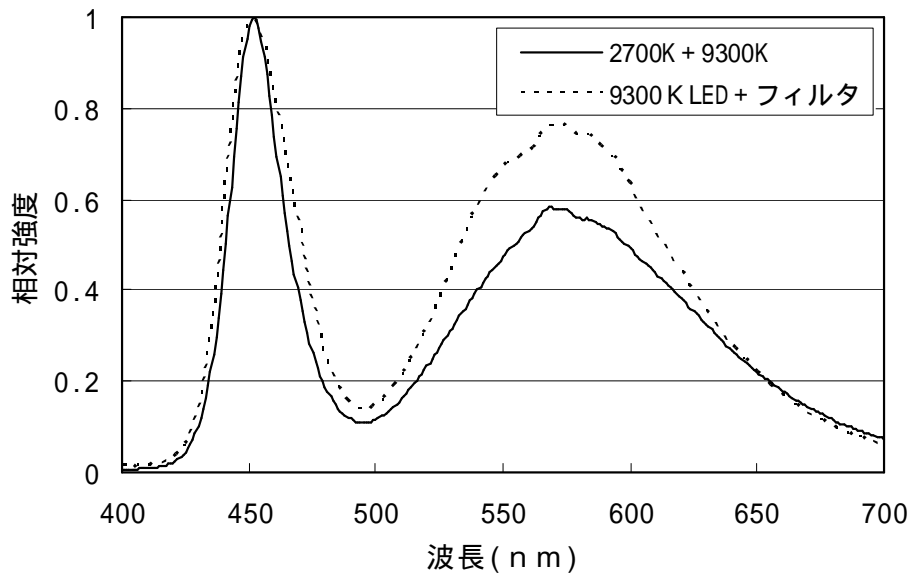


図 2.3 5000K 実験照明の分光スペクトル

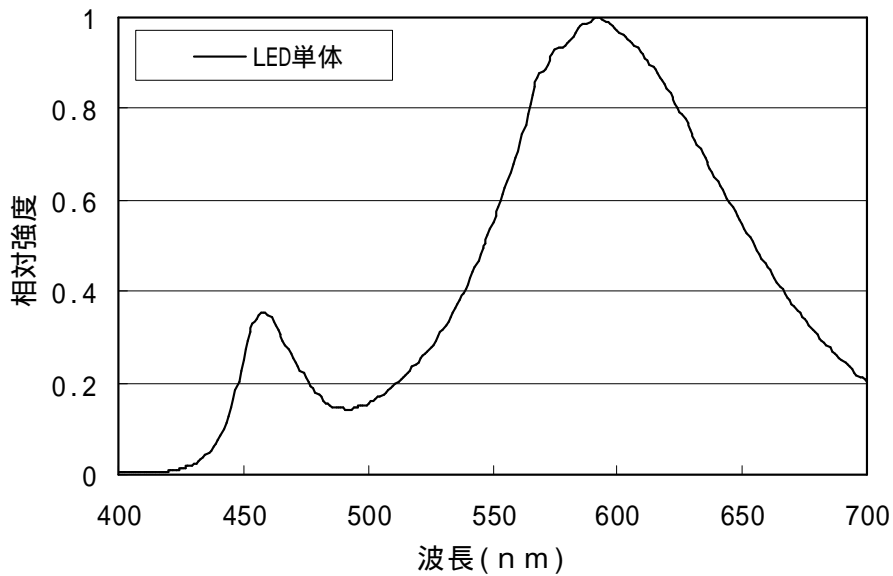


図 2.4 8800K 実験照明の分光スペクトル

また、それぞれの条件照明の xy 色度を図 2.5 に示す。

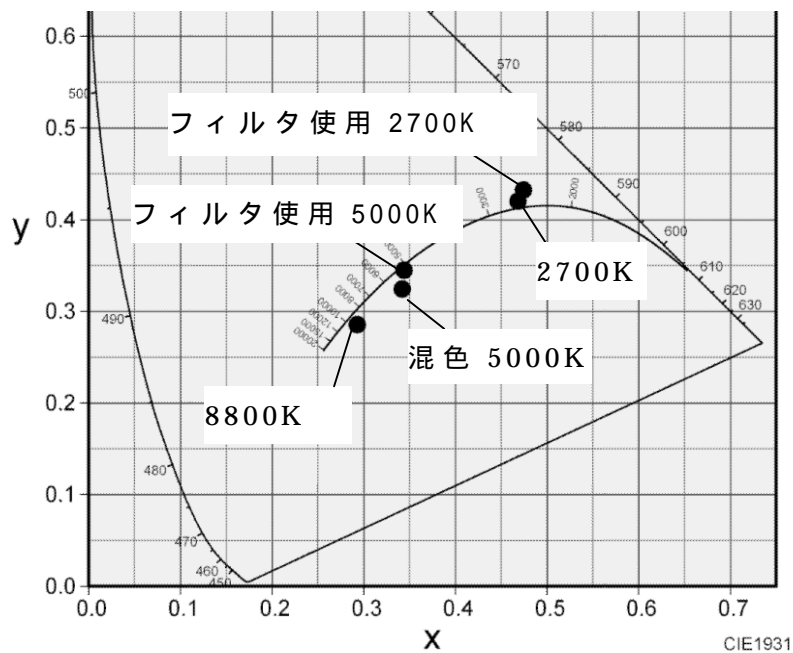


図 2.5 実験照明の色度 (x-y)

実験は照明の色温度変換方式毎に別々に行った。文書面照度は読書の照度基準 (JIS9110) を参考に 400 [lx] とした。

実験は暗室内で行い、実験照明以外の光源が被験者の目に入らないようにした。実験照明のレイアウト写真を図 2.6 に示す。一つの照明で実験を行っ

ている際は他の照明が目に入らないように暗幕で覆って実験を行った。

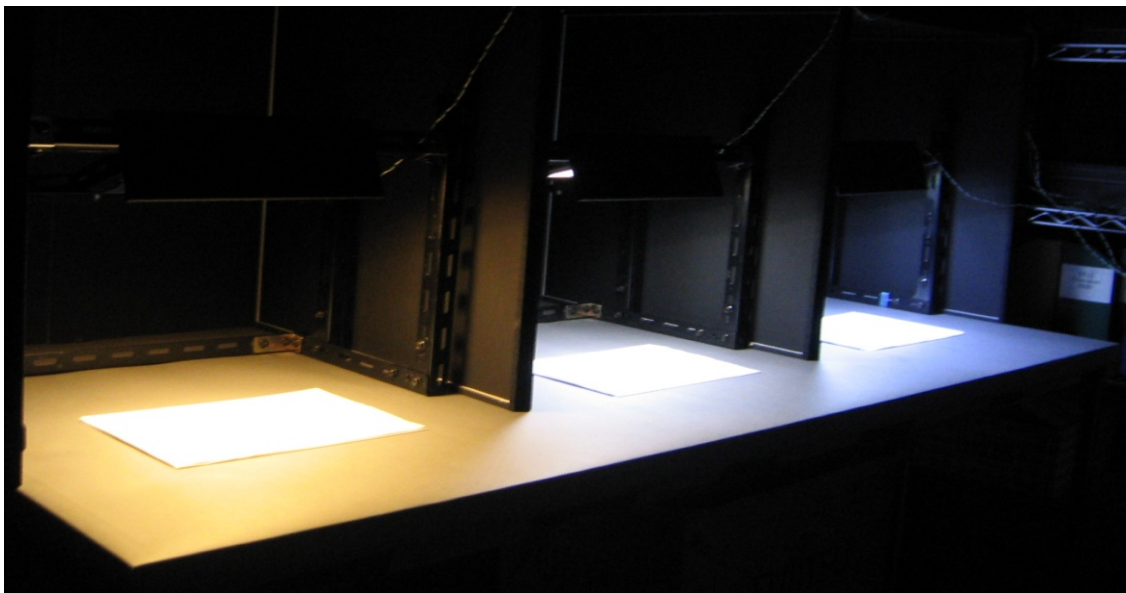


図 2.6 実験照明

2.2.2.2 被験者

被験者は 19 歳から 81 歳までの男女で年齢層ごとの人数は照明パターンにより表 2.3, 表 2.4 の通りである。被験者の視矯正は日常生活で読書を行う場合と同じとした。

表 2.3 被験者の年齢層ごとの人数 (照明パターン)

被験者区分	人数
若年層 (39 歳以下)	13 名
中年層 (40 歳 ~ 64 歳)	16 名
高年層 (65 歳以上)	14 名

表 2.4 被験者の年齢層ごとの人数 (照明パターン)

被験者区分	人数
若年層 (39 歳以下)	12 名
中年層 (40 歳 ~ 64 歳)	12 名
高年層 (65 歳以上)	14 名

2.2.3 実験手順

紙面文字の見やすさの主観評価及び、読書を想定した視作業性評価を行った。被験者は表 2.2 に示したパターン もしくはパターン のいずれかの照明下において実験を行った。

実験の手順は図 2.7 のように印刷紙面の黙読による文字の見やすさの主観評価を行い、その後、かな拾いによる視作業を行った。印刷紙面は新聞全国紙数紙の社説を引用印刷したもので、A4 横の紙に 600 文字程度の読み物を 2 つ印刷したものを使用した。

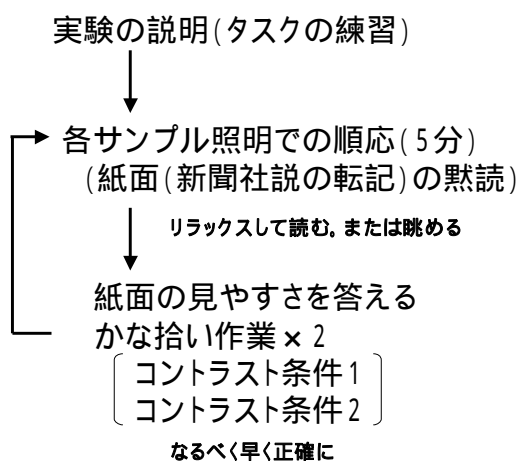


図 2.7 実験の手順

2.2.3.1 紙面の文字の見やすさ

5 分間照明下での順応を兼ねて黙読を行った後、文字が見やすかったかについて図 2.8 の手前の紙のように見やすいから見にくいまでの 7 段階で回答することで評価した。

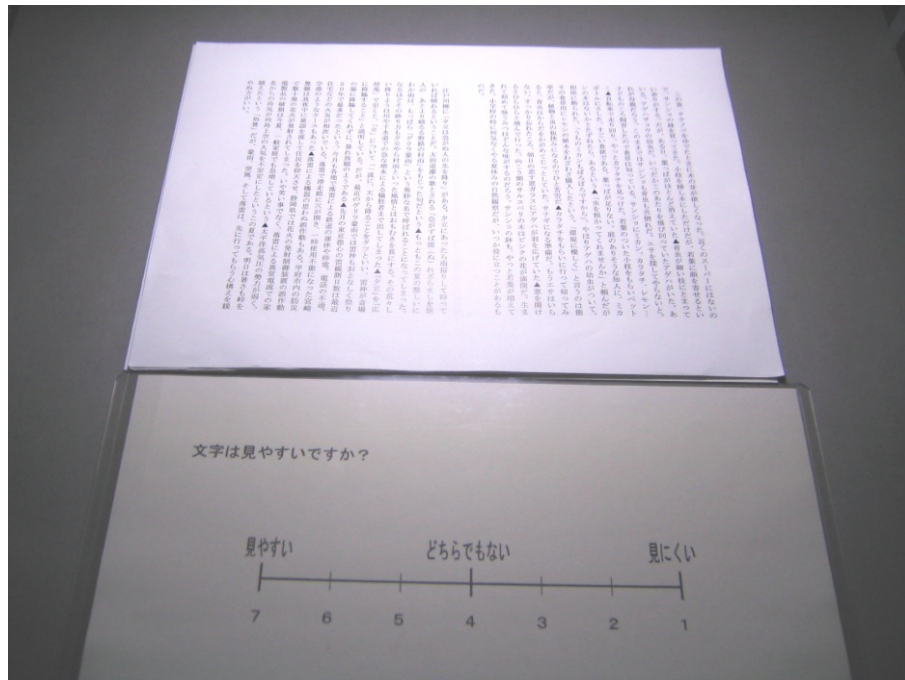


図 2.8 文字の見やすさ評価に使用した紙面例

2.2.3.2 視作業性

視作業性の評価はかな拾いテストを使った抹消作業⁷⁾によって行った。被験者はランダムに並んだ混同しやすい文字の中から「あ」の文字だけを見つけてをマーキングする。読む方向は縦書きの日本語文章を想定し、右側から縦(常に上から下)方向とした。テストに要した時間と正答率(記入数 / 全数)を求めた。実験に使ったタスク例を表 2.5 に示す。タスク紙面の文字は一般的な新聞紙と同程度の文字の大きさ、文字間隔、文字配列になるように設定した(明朝体扁平, 10~11pt, 一行の文字数 12 文字, 段の高さ 35mm)。文字のコントラストは条件としてプリンタの印刷濃度を 50% としたものと 25% としたものを使用した。表 2.5 にタスク紙面の例を示す。

表 2.5 タスク紙面の例

	タスク紙面の例
濃度 50%	<p>めめねおおおゆめめぬゆゆねぬおゆあおねゆ ゆぬねおねめおめねねめぬゆゆめねめゆゆぬ ぬおあぬぬぬめゆあめねぬおゆおおめおねおお ぬゆめゆめねぬおおおめめめぬゆねめおゆゆ ねねめねおゆおぬぬめねおゆあぬめぬねゆおおぬめ めぬぬぬおねゆめおめおぬあぬねゆおおぬめ あねぬめめぬおゆめゆあぬめおおねゆねぬぬ ゆおねゆおあぬゆねおゆめめねあゆゆぬおね めめぬゆぬめゆねゆめゆめめあめゆゆぬめね ねねおゆぬねおゆぬねぬゆねねぬめおぬゆゆ</p>
濃度 25%	<p>ぬゆねねおおねねめゆねおねねめゆおねおゆ ぬおぬおねねゆゆめめめめおぬゆおゆめめ めぬおおめぬぬおぬおあめゆねおおめゆねね ゆぬめゆおおおめあぬおゆめぬおおぬゆぬゆ おぬぬぬぬめおねあめゆおあぬあねあめゆあ ねぬめゆめめめおおおゆめおおめねねめねぬ ねめねおめぬゆねねゆおねねねゆゆゆゆぬゆ ぬねゆねぬぬぬゆねぬゆゆねねねねゆめゆ めあめねめぬめおねあぬぬめぬおゆあめゆぬ ゆねねめぬぬあめめめゆおめゆおぬゆぬ ぬめぬゆぬゆおめねぬ</p>

使用文字：あ，お，ぬ，ね，め，ゆ

実験条件におけるそれぞれの印刷濃度での紙面の輝度コントラストを表 2.6 に示す。輝度の測定は TOPCON BM-5A を使用した。色温度の変換方法や色温度によって輝度コントラストに差異はなかった。コントラストは式 (1) に示したように計算した。

$$\text{コントラスト} = (L_{\text{文字部}} - L_{\text{背景}}) / L_{\text{文字部}} \cdots (1)$$

表 2.6 タスク紙面の文字と背景の輝度コントラスト

	2700K 照明	5000K 照明	8800K 照明
濃度	フィルタ使用：0.68	フィルタ使用：0.68	0.69
50%	LEDのみ：0.68	混色：0.68	
濃度	フィルタ使用：0.35	フィルタ使用：0.35	0.36
25%	LEDのみ：0.35	混色：0.35	

2.2.4 実験結果

2.2.4.1 紙面の文字の見やすさ

各色温度照明下での文字の見やすさについて採点を行った7段階での点数を個人の評価幅のばらつきを考慮して規準化(平均を引き,標準偏差で除す)した。規準化した点数について被験者の年齢層別に平均値を求めた。照明パターン の結果を年代別に図2.9に示す。エラーバーは95%信頼区間である。

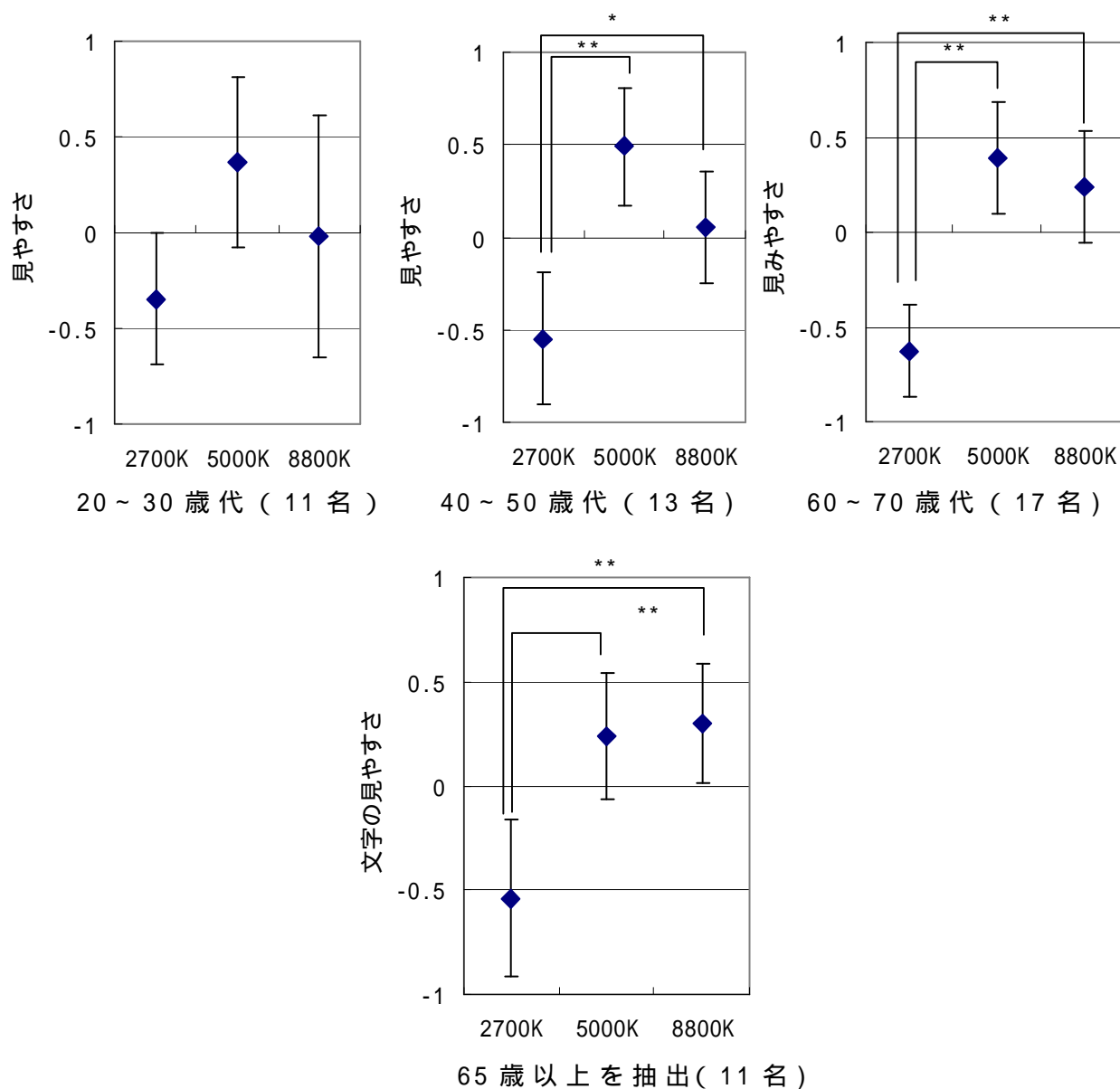


図 2.9 照明パターン における相関色温度に対する見やすさ

*: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$

色温度条件ごとの統計的有意差を tukey の多重比較で見たところ，20～30歳はばらつきが大きく，有意差がなかった．40歳以上の被験者は色温度による有意差があり，視覚的低下が見られる年齢では色温度が変わることによる見やすさへの影響があることが考えられる．すべての年齢層において 2700K の照明は見難く，文字を見る環境としては好ましくないと考えられる．全ての年齢層において 5000K が見やすさが高いことが示されたが，60～70歳代では 8800K の評価が上がる傾向が見られた．65歳以上の年齢の被験者のみ抽出するとさらにその傾向が強くなることから，高齢者には色温度が高い照明の方が文字が見やすいと考えられる．

照明パターン の結果を図 2.10 に示す．照明パターン についても 20～30歳代ではばらつきが大きく，統計的有意差は見られなかった．40～50歳代では 5000K が最も見やすく，60～70歳代では 8800K が見やすい結果となった．照明パターンによらず，2700K はすべて文字が見難く，高齢者は色温度が高い方が見やすいことが示された．

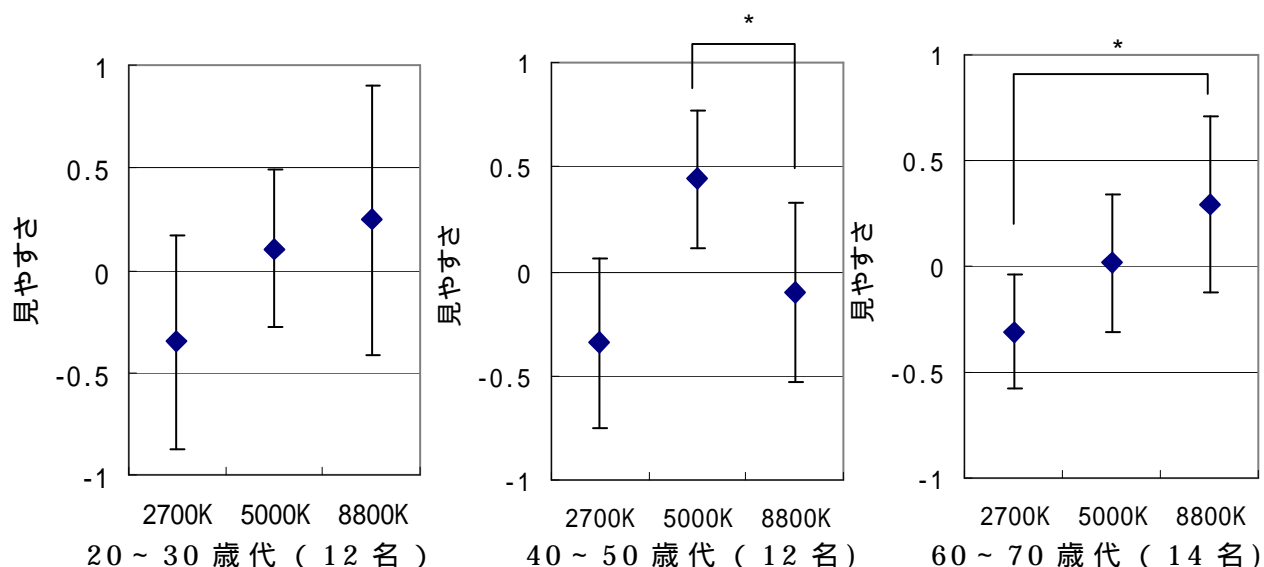


図 2.10 照明パターン における色温度に対する見やすさ

分光分布による見やすさの違いを比較するため，図 2.2 で比較した 2700K 照明の二つの照明下での見やすさの違いを図 2.11 に示した．文字の見やすさに統計的有意差は無かったが，年齢が高いグループでややフィルタを使用しない 2700LED (LED 単体) の方が見やすい傾向が見られた．さらに 5000K 照明環境に

ついても比較を行った。こちらも統計的有意差は無かったものの、2700K+9300K（二つの LED での混色）よりもフィルタを使用したタイプの物の方がやや見やすい傾向が見られた。図 2.5 で示した色度から、やや見やすい傾向があった方が黒体軌跡に近く、より白さが高いためではないかと推測される。

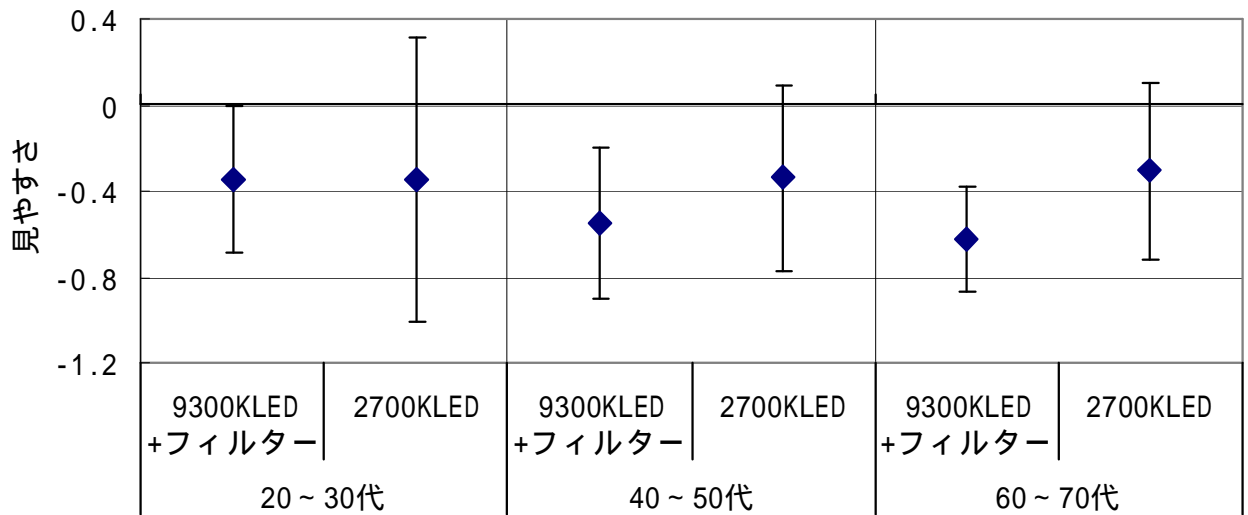


図 2.11 2700K 照明の色温度変換方式による見やすさの違い

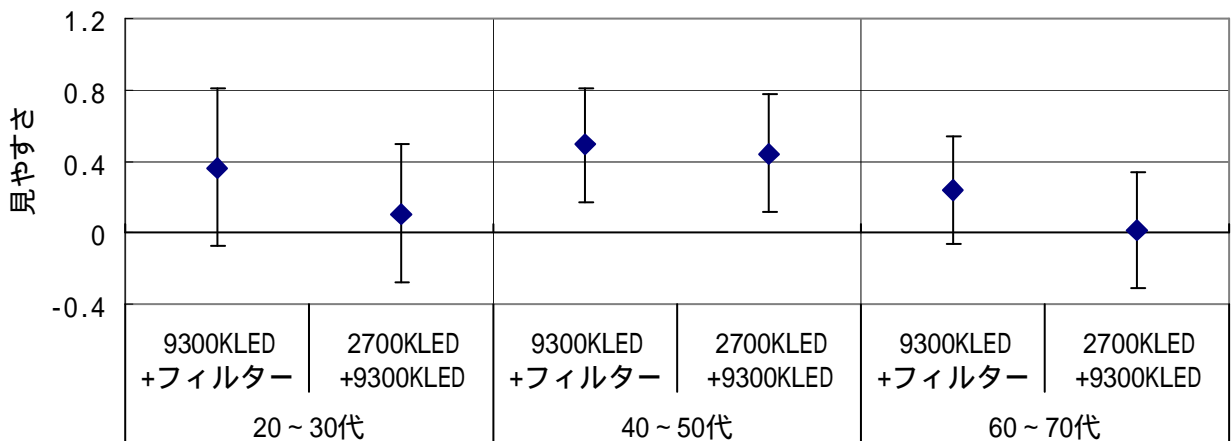


図 2.12 5000K 照明の色温度変換方式による見やすさの違い

2.2.4.1 視作業性

照明の色温度による抹消作業タスクによる視作業性の結果について述べる。被験者が課題を始めてから終わるまでの所要時間を計測し、遂行速度（文字数 ÷ 所要時間）と正答率（正解数 / 全数：12個）を求め、以下の式をもって視作業性とした。

$$\text{視作業性 (個 / sec.)} = \text{遂行速度} \times \text{正答率} \dots \dots \dots \text{(式 1)}$$

各年齢層別の視作業性の平均値について照明パターン の場合を図 2.13 に、照明パターン での結果を図 2.14 に示す。図中の a はコントラスト条件 0.35、b はコントラスト条件 0.68 である。エラーバーは 95% 信頼区間である。どちらの照明パターンにおいても若年齢層 (20 ~ 30 歳代) と中年層 (40 ~ 50 歳代) ではほとんど視作業性は変わらないが高齢の被験者 (60 ~ 70 歳代) は明らかに視作業性が低く、平均値は若年齢層の 60 ~ 70% 程度であった。また、コントラスト条件での違いを見ると若年齢層、中年層はコントラストの低下によって視作業性にほとんど影響を受けないが、年齢が高くなるに従ってコントラスト条件による差が見られ、若年齢層や中年層では問題ないコントラストでも高齢者にとっては視作業性が低下することがわかった。色温度による違いはみられなかった。

また、被験者の目の白濁度を表 2.7 の区分によってグループ分けし⁸⁾、視作業性を比較した。照明条件 の結果を図 2.15 にしめす。眼の白濁度が進むに従って視作業性は低下し、コントラストによる差が大きくなる傾向がある。2700K のデータを例にとって白濁度に対する視作業性のグラフを図 2.16 に示す。コントラストがより低い条件 a の方がデータの傾斜が大きく、目の白濁度による視作業性への影響が大きい。加齢による水晶体の白濁の影響がコントラスト低下に対する視作業性の低下に影響を与えていることがわかる。

関連色温度による視作業性の差は見られなかった。

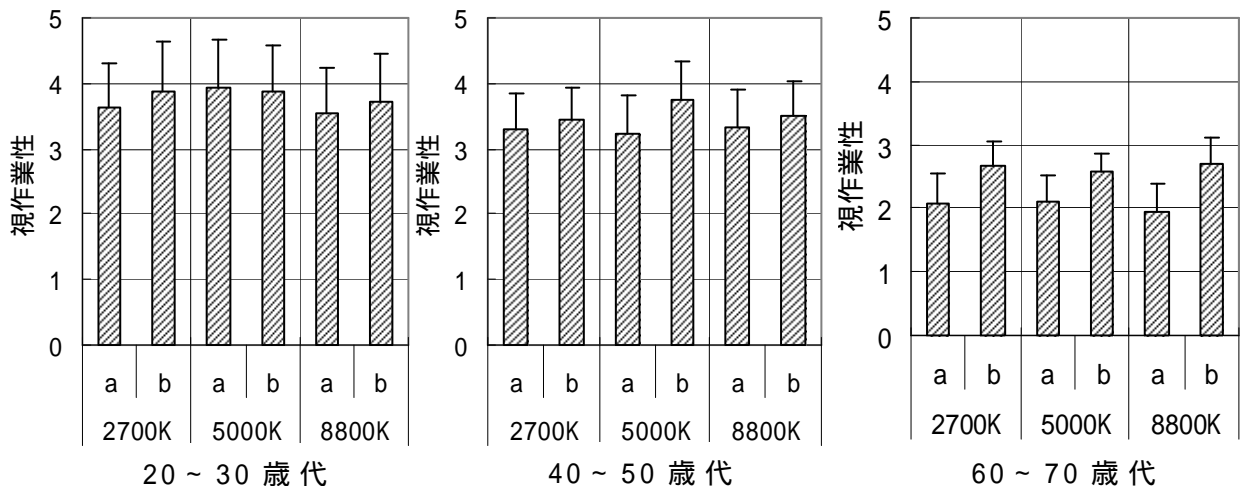


図 2.13 照明パターン の年齢層別視作業性

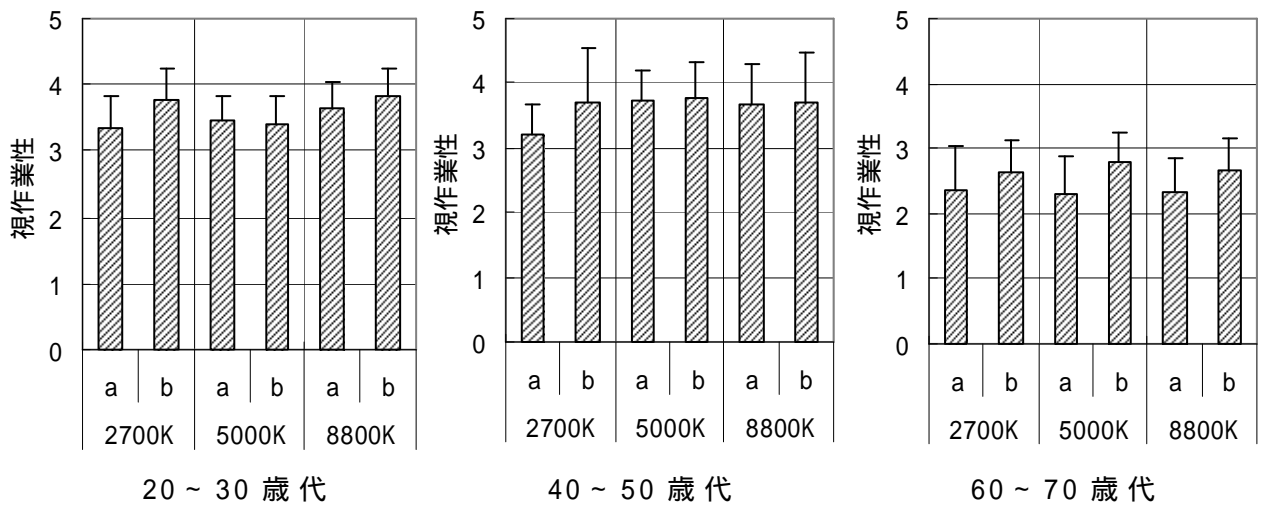


図 2.14 照明パターン の年齢層別視作業性

表 2.7 白濁度の区分

1 : 白濁ほとんどなし	~ 9 9
2 : やや白濁	1 0 0 ~ 1 4 9
3 : かなり白濁	1 5 0 ~

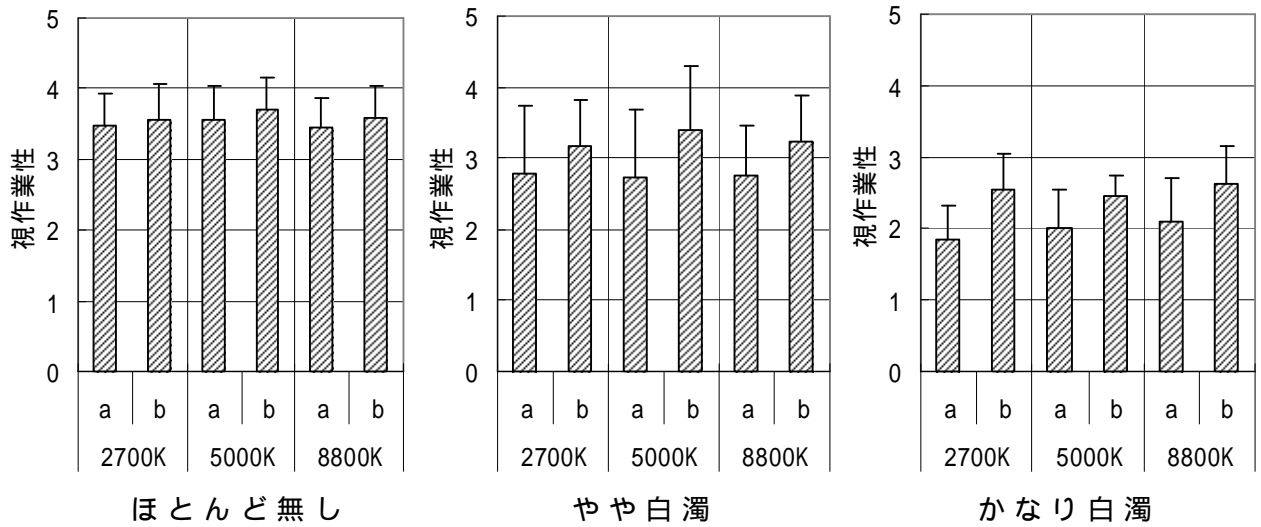


図 2.15 照明パターン における眼の白濁度に対する視作業性

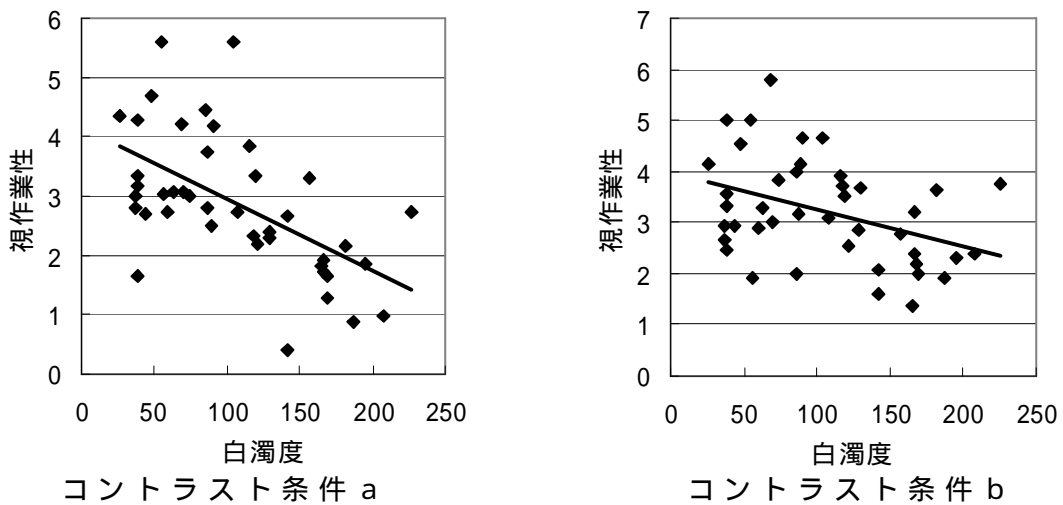


図 2.16 照明パターン 2700K における眼の白濁度に対する視作業性

2.2.5 まとめ

本章における研究によって視作業性の効率に対しては色温度の影響は小さいことがわかった。しかしながら，見やすさの評価は 2700K に対して低く，視作業性には現れないが，目の負担になる可能性があることを示唆している。高齢者は視作業性において他の年代に対して 30～40%の低下が見られるた

め，少しでも見やすい環境を作ることが重要と考えられる．高齢者が文字を読む環境として，高色温度照明を使用することは助けになると考えられる．

文字の見やすさは輝度コントラストと関係があることから⁹⁾，加齢による水晶体の黄変化に伴う分光視感度の変化によって，高齢者は色温度が高いほうがより白く感じられ，見かけのコントラストが高くなり，文字が見やすく感じると推測される．

年齢に応じて適した色温度の設定をすることでより生活しやすい空間，作業しやすい空間をつくることができると考えられる．

2.3 色文字に対する可読性への光源による分光スペクトルの違いの影響

2.3.1 背景と目的

LED照明の普及に伴い、コンビニエンスストアや薬局など、これまで蛍光灯が設置されている店舗にもLED照明が設置されるようになってきている。このような店舗では多くのパッケージ商品が扱われており、パッケージの見えるの良さは照明に求められる要求の一つである。

パッケージ商品には文字表記があり、特に薬のパッケージなどは表記の可読性が重要と考えられる。2006年の薬事法の改正から、2009年4月より販売登録者制度が始まり、第二類、第三類の医薬品もコンビニなどで販売されるようになった¹⁰⁾。コンビニエンスストアにおける照明設計において、表記の可読性も重要となることが考えられる。

パッケージ商品の表記には色彩を使用しているものが多く、その色の違いや色の組み合わせによって可読性が異なることが予想され、さらにそれは照明条件によって影響を受けることが考えられる。照明条件による文字の可読性については、読書などを対象とした多くの研究事例があり、通常は照度が大きく影響するとされる¹¹⁾¹²⁾。一般に文字の可読性に対しては、背景と文字のコントラストが最も大きい要因となることが分かっているが¹³⁾¹⁴⁾、色文字の場合には、背景との色の組み合わせによっては輝度コントラストと可読性の評価が一致しない場合があることが報告されている^{15~17)}。前述の研究はモニタ画面上の色表示であり、パッケージのような印刷物の可読性においてはさらに光源の影響を大きく受けることが予想される。

照度が同じ場合においても光源が異なる場合には分光スペクトルの違いによる色の見えの違いから可読性が異なることが予想される。LEDと蛍光灯は分光スペクトルが大きく異なるため、色の見えが異なることが指摘されている¹⁶⁾。

また加齢による視感度の低下は波長依存性があり、水晶体の透過率の変化から短波長から中波長の感度が減少することがわかっている¹⁸⁾。JIS S0031¹⁹⁾で示されている交照法で求めた年代別分光視感効率は加齢による短波長域の低下が顕著である。また、直接法による年代別明るさ分光視感効率は長波長域における低下も指摘されている²⁰⁾²¹⁾。以上のことから光源による色の見えの違いは観察する人間の年齢によって表れ方が異なると考えら

れる。

本研究は光源の違いが色文字の可読性に与える影響について明確にすることを目的とした。そのために印刷物表記色の組み合わせによる可読性についてLEDと蛍光灯を使用した実験を行い、可読性の違いについて検討した。また、高齢者実験により、色文字の可読性における加齢の影響について検討を行った。

2.3.2 市販薬のパッケージ表記に使われる色の可読性の研究

マイボイスドットコム株式会社の風邪薬の利用に関するアンケート結果によれば²²⁾、市販の風邪薬を選ぶ際、最も重要視する点は効能・効果であり、それはパッケージ表面に記載されている。

薬パッケージの背景と文字の色は様々な組み合わせがあるが、実際使用されているような色の組み合わせの可読性がどの程度異なるのかについて高齢者を対象とした実験を行った。

2.3.2.1 実験に使用する色の組み合わせの選択

前述の風邪薬の利用に関するアンケート結果より、よく利用する市販風邪薬のブランド調査結果の上位12種を取り上げ、効能の記述に使われている色の組み合わせを調査した結果を図2.17に示す。

黒白以外に多かった赤系と黄系、赤系と白、青と白の組み合わせを実験に使用することとした。他に薬局店頭で調査を行い、頭痛薬に多く見られる青と黒の組み合わせ、及び胃腸薬に多いベージュと緑の組み合わせを選択した。

以上の組み合わせが使用されている市販薬の写真から画像ソフトにより色を抽出し、評価用のチャートを作成した。図2.18に使用したチャートを示す。図中色の組み合わせの表記は背景/文字の順である。実験シートとして、A3の事務用コピー用紙に基準とする白黒のチャートと評価する6つのチャートをレーザープリンタで印刷した。文字は市販薬の効能を表わす言葉とし、字体はMSPゴシック、字の大きさは10pt.、各チャートのサイズは幅60mm、高さ40mmとした。

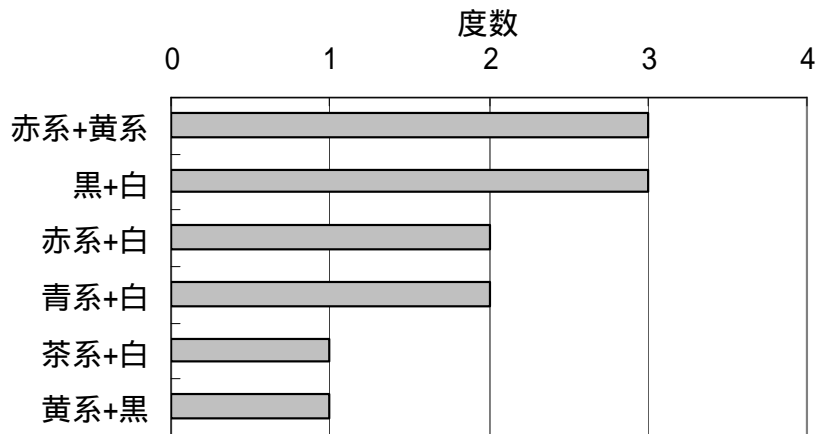


図 2.17 よく利用されている市販風邪薬の効能表記の色の組み

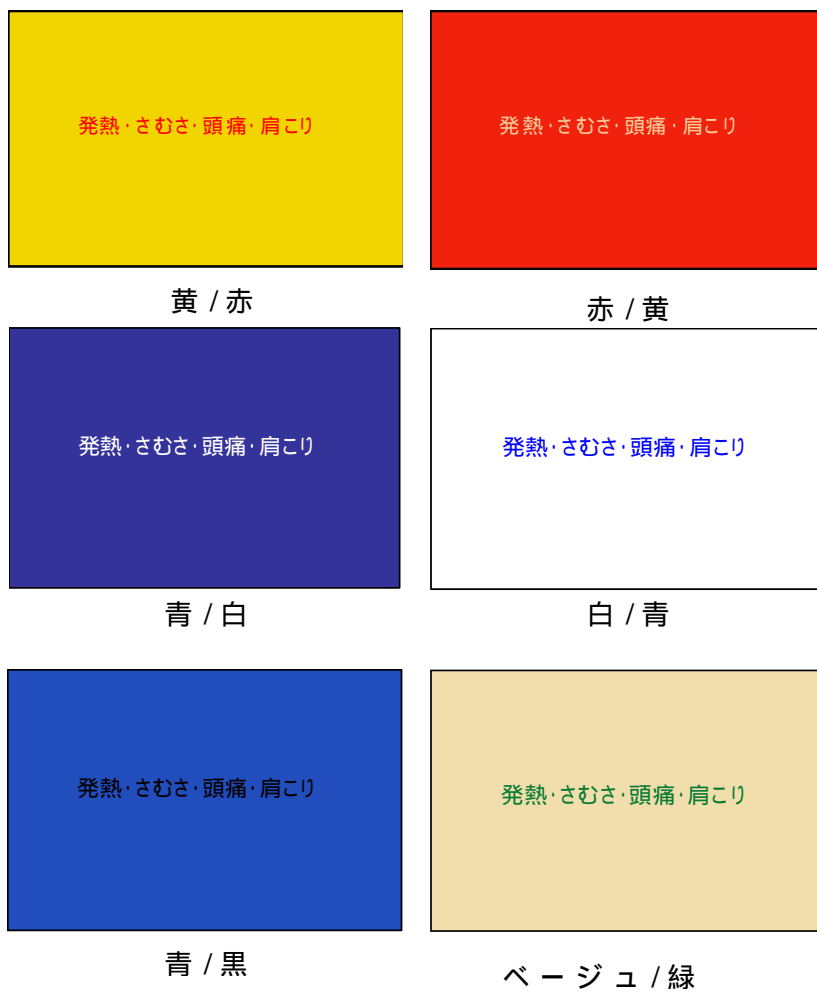


図 2.18 実験した色の組み合わせによる表記

2.3.2.2 評価方法

図 2.19 に示した白黒チャートを 10 点として各々の組み合わせに対する文字の読みやすさについて点数付け評価を行った。

2.3.2.3 照明条件

無彩色の紙で内側を覆った観察ボックスに一般的に店舗で使用されている昼白色の 3 波長形蛍光灯を設置した。観察面の照度はコンビニ実店舗における照度調査に基づき、商品棚上面の照度と同じ 900 [lx] になるよう設定した。図 2.20 に分光スペクトル、図 2.21 に観察ボックスの写真を示す。

2.3.2.4 被験者

被験者は眼科手術の経験がなく、石原式色覚異常検査票によって色覚に特異性が認められなかった 60 歳から 73 歳の 21 名（男性 9 名、女性 12 名）にて評価を行った。被験者の視力矯正は日常生活と同じとし、観察距離は 500mm ~ 600mm とし、固定せずに実験を行った。

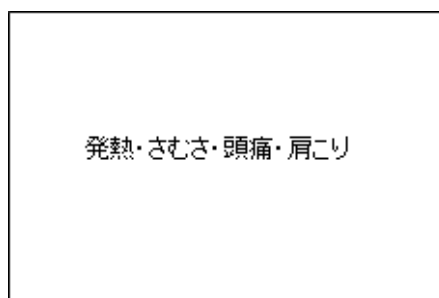


図 2.19 基準とした白黒表記

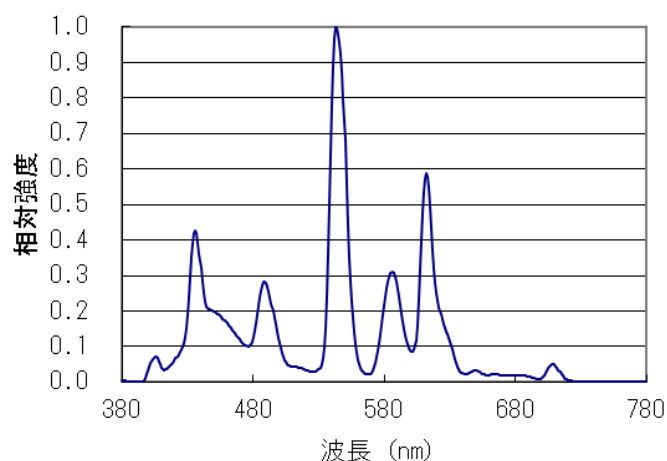


図 2.20 実験用蛍光灯照明の分光スペクトル

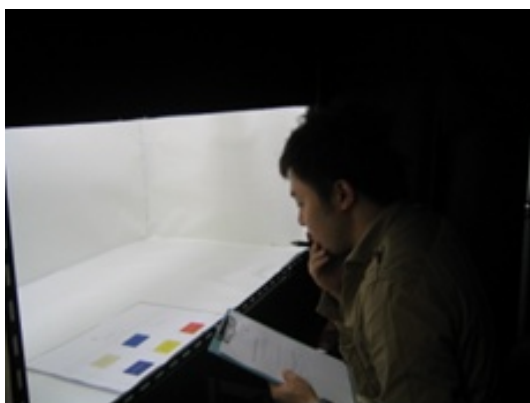


図 2.21 観察 BOX

2.3.2.5 評価結果

色の組み合わせに対する文字の読みやすさ評価結果について被験者 21 名の平均値を図 2.22 に示す。エラーバーは 95% 信頼区間である。評価の結果、一般によく見られるような市販薬のパッケージの背景と文字の組み合わせであっても可読性が大きく異なることがわかった。白と黒の組み合わせに対してはすべて評価が低く、色の組み合わせによっては評価が 2 倍程度異なることがわかった。このことから照明条件により、少しでも視認性向上を図ることは実生活において有用であると考え、照明の違いと色の組み合わせによる可読性の検討を行うこととした。

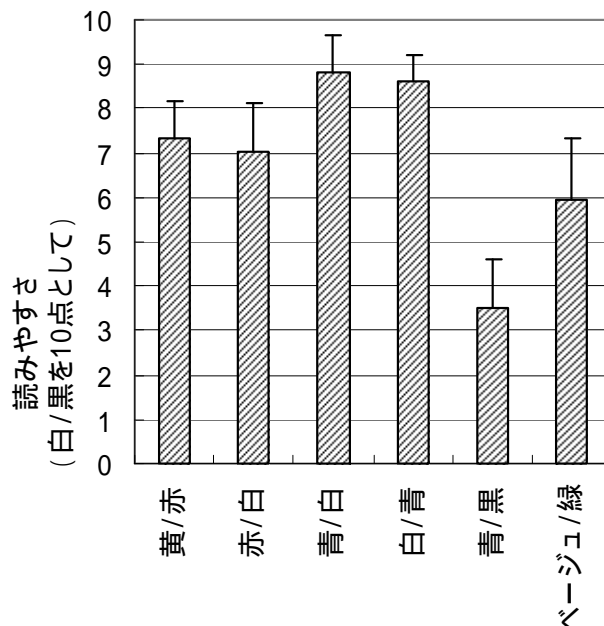


図 2.22 色の組み合わせによる読みやすさの点数

2.3.3 照明の違いによる可読性の比較研究

蛍光灯下とLED照明下で、色文字の見えがどのように異なるかについて検討するため、色の組み合わせを変更した場合の可読性の比較実験を行った。

2.3.3.1 実験照明

図 2.20 の 3 波長形直管蛍光灯と、図 2.23 に示す分光スペクトルを持つ直管形LED照明を使用した。それぞれの光源を背景及び机上面を無彩色にした実験用BOX内に別々に設置した。表 2.8 に照明の平均演色性評価指数 Ra と観察面で測定した色温度、色度(x,y)を示す。観察面の平均照度は900[lx]とした。

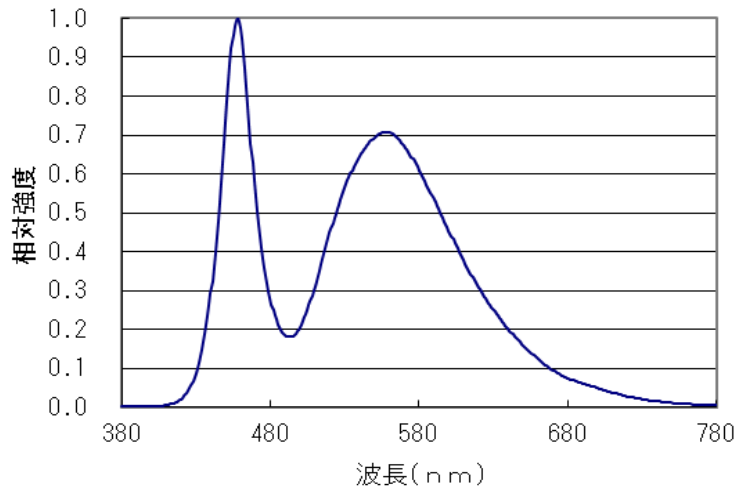


図 2.23 直管形 LED 照明の分光スペクトル

表 2.8. 実験に使用した照明の特性

照明	Ra	色温度 [K]	x	y
直管形 LED	65	5920	0.32	0.36
3 波長形 蛍光灯	73	5350	0.34	0.37

2.3.3.2 被験者

視機能の低下が考えられる高齢者を対象とした。被験者は 61～85 歳の石原式色覚検査表によって色覚に特異性が認められなかった男女 24 名で、実験時の視矯正は通常読書をする際と同じとした。被験者の年齢分布は図 2.24 の通りである。

2.3.3.3 観察対象の色の組み合わせ

2.3.3.3.1 背景色の選定

25 種類の色を印刷した紙を準備し、蛍光灯と LED 照明下で色票の反射光をコニカミノルタ CS1000A で測定した。赤系、緑系、青系、黄系の中から照明による測定値の違いが比較的大きなものを 1 つずつ背景色として選択した。各色の X, Y, Z 測定値と標準白色板による X_n, Y_n, Z_n 測定値から求めた色票の a^*b^* 値を図 2.25 に示す。照明による色の現れ方は青系の背景では無く、緑系でやや認められ、黄系、赤系において比較的大きかった。また LED 照明

下より蛍光灯下の方が彩度が高く現れている。

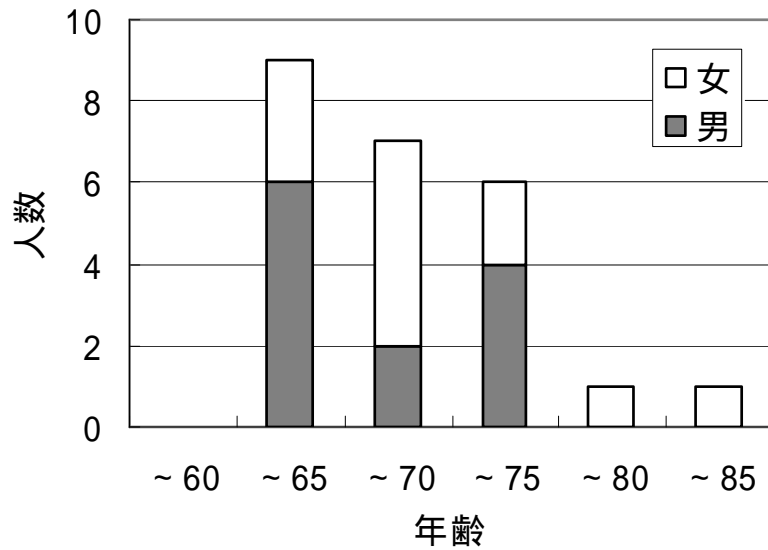


図 2.24 被験者の年齢分布

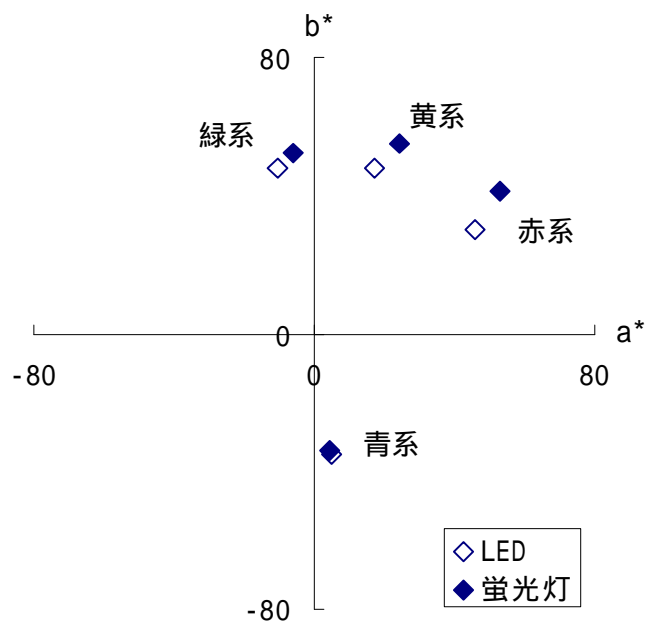


図 2.25 各照明下での背景に使用した色の a*b*

2.3.3.3.2 背景に対する文字色の組み合わせと実験シート

ここでは、高齢者にとって読みにくい色の組み合わせの可読性を調べる。そのために、2.3.3.3.1 で選定した背景に対する文字色は、FUJITSU color selector 5.11²³⁾を利用し、背景色に対し白内障の症状がある場合に見えにくいとされる色を選んだ。各背景に対し文字色は4種類選択した。共通の文字色として全背景色に白文字の条件を加え、全部で20通りとした。表2.9に実験に使用した色の組み合わせを示す。

図2.26に使用した文字色の a^*b^* 値を示す。 b^* が小さいエリアでは比較的照明による色の違いが少ない。また蛍光灯下のほうが全体的に a^* や b^* が正側に現れており、蛍光灯下ではLED下よりも赤みと黄みが強く現れていることがわかる。

2.3.1と同様に、幅60mm高さ40mmの範囲のほぼ中央に薬の効能を表記したチャートを実験シートとして使用した。文字の字体はMSPゴシック、文字の大きさは10pt.である。文字列の幅は36mmとなり、観察距離は600mm前後なので視角 $3^\circ \sim 4^\circ$ となる。実験シートはA3の用紙に20種の色の組み合わせチャートを横4列、縦5列に並べたものを用いた。並べ方はランダムとし、チャートの位置による影響を避けるため、並び方の異なる評価シートを3種類作成した。実験シートの1例を図2.27に示す。

2.3.3.4 実験方法

最初に、被験者に白黒で実験の流れの説明文を印刷した用紙を見せながら実験方法の説明を行った。この間、実験照明である蛍光灯もしくはLED照明に2分程度順応させた。順応後、文字の読みやすさの評価を行った。被験者は視力矯正の度合いが異なるため、視距離は固定せず、600mm前後の見やすい位置で実験を行うよう指示した。読みやすさの評価はそれぞれの表記の読みやすさを、非常に読みにくい(-2)、読みにくい(-1)、どちらでもない(0)、読みやすい(1)、非常に読みやすい(2)の5段階で行った。実験時の様子を図2.28に示す。

表 2.9 実験に使用した色の組み合わせ

サンプル	背景色	文字色	サンプル	背景色	文字色
	赤系	白		青系	白
	赤系	紺色		青系	赤茶
	赤系	深緑		青系	レモン色
	赤系	水色		青系	クリーム色
	赤系	黄緑		青系	コバルトブルー
	黄系	白		緑系	白
	黄系	ウルトラマリン		緑系	赤紫
	黄系	インディゴ		緑系	コバルトブルー
	黄系	黒		緑系	水色
	黄系	茶		緑系	コバルトグリーン

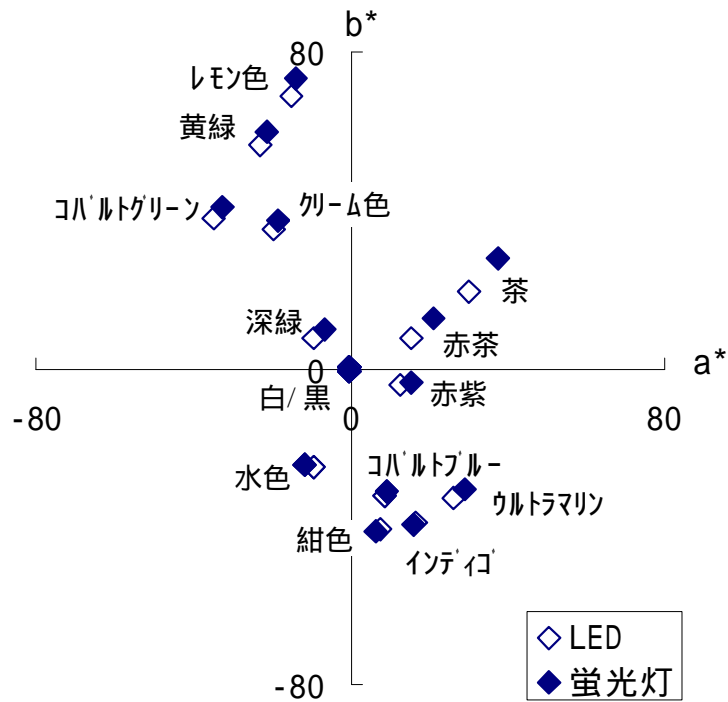


図 2.26 実験に使用した文字色の a*b*



図 2.27 実験シートの例と表 2 との対応

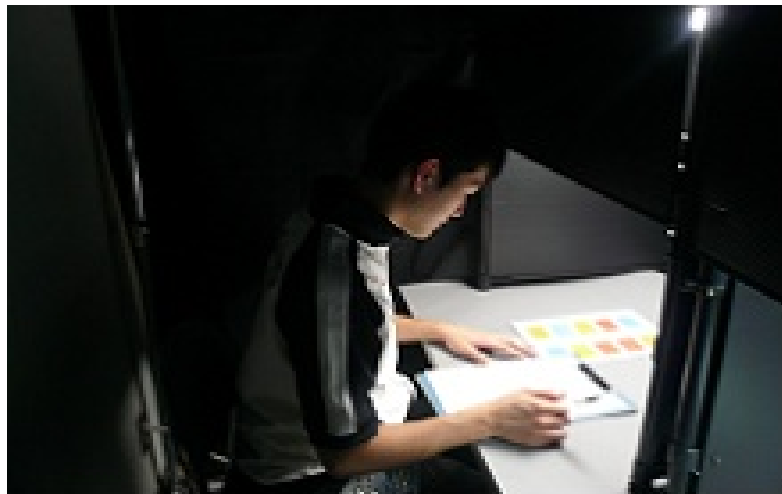
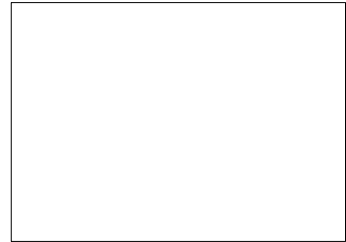


図 2.28 実験風景

2.3.3.5 実験結果

20種のチャートのそれぞれの照明下での評価結果の平均値を図2.29に示す。エラーバーは95%信頼区間である。男女間に評価の差は見られなかった。

全体的に色の組み合わせの違いによる読みやすさの違いが大きく、照明の違いによる読みやすさの差は小さいが、4つの組み合わせにおいてt検定による有意差が認められた。原¹⁷⁾らによると、色文字の可読性において最も大きく影響するのが輝度（明度差）であり、次に色の影響があることが報告されている。それぞれの照明下での背景と文字の明度差： L^* と読みやすさ評価との相関関係を図2.30に示す。評価と L^* には強い相関が認められ、本実験の条件では、可読性は背景と文字の明度差の違いによって説明できることが示された。照明による読みやすさが異なった、 L^* 、 L^* 、 L^* について L^* を比較すると、 L^* 以外は L^* がほぼ同じでも読みやすさの違いがあることが示された。照明の分光スペクトルの違いと加齢による分光感度の低下は高齢者が見る明度差に総合的に影響すると考えられる。

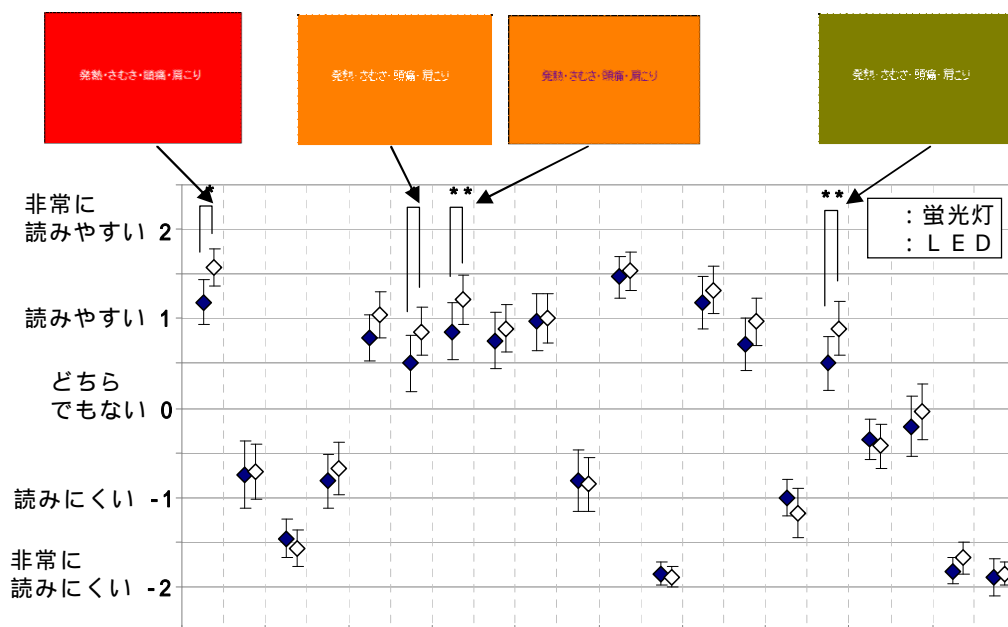


図 2.29 照明による可読性の違い

* : $p < 0.05$
 ** : $p < 0.01$

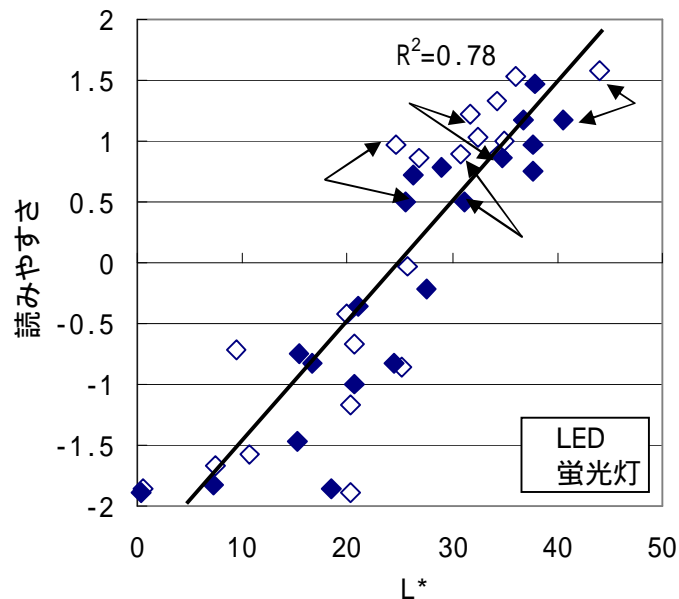


図 2.30 文字と背景の明度差と可読性評価との関係

2.3.4 年齢層による可読性の違いに対する光源の影響についての研究

加齢による色の見え方の変化は文字と背景の色それぞれに影響を与え、照明の違いによる色の現れ方も加齢特性によって見え方が異なることが考えられる。加齢により、分光視感度が短波長側や長波長側での低下が考えられることから²⁰⁾²¹⁾、赤系や青系の色を使って、年齢による可読性の違いを求める実験を行った。

2.3.4.1 実験照明

表 2.8 に示した 2 種類の照明を使用した。

2.3.4.2 被験者

眼科手術の経験がなく、石原式色覚検査表によって色覚に特異性が認められなかった被験者で実験を行った。視矯正は被験者が日常行っている最も読みやすい状態で行った。若齢者は 18 歳～23 歳で 52 名、高齢者は 61 歳～80 歳の 34 名である。被験者の年齢と性別の分布を図 2.31 に示す。

2.3.4.3 実験に使用した色の組み合わせと実験シート

実験時に使用した色の組み合わせを表 3 に示す。赤，青，白，黒を用い、

それぞれ文字と背景の組み合わせを作成した。背景と文字に使用した色の各照明下での a^*b^* 値を図 2.32 に示す。また、背景と文字の明度差 L^* を図 2.33 に示す。

2.3.2 や 2.3.3 と同じ書式で色の組み合わせチャートを作成した。実験シートとして、A4 横の用紙に 9 種の色の組み合わせチャートを横 3 列、縦 3 列に並べたものを準備した。白黒の組み合わせを一番左上に配置し、それ以外のチャートはランダムに並べた。チャートの並べ方の異なる実験シートを 3 種類作成した。これは、白黒チャートを最初に評価させることで、その読みやすさを被験者が評価の基準とするように意図したためである。

2.3.4.4 実験方法

図 2.34 に評価に使用した回答用紙の一部を示す。可読性評価は片側 3 段階の 7 段階で行った。

被験者は実験の説明を受けながら、1 分以上一方の照明に順応した後、実験を開始した。視距離は固定せず 500mm~600mm とし、それぞれの色の組み合わせに対する評価を行った後、もう一方の照明の下で順応を行い、再度色の組み合わせに対する評価を行った。順序効果を考慮して実験シートは毎回変更した。

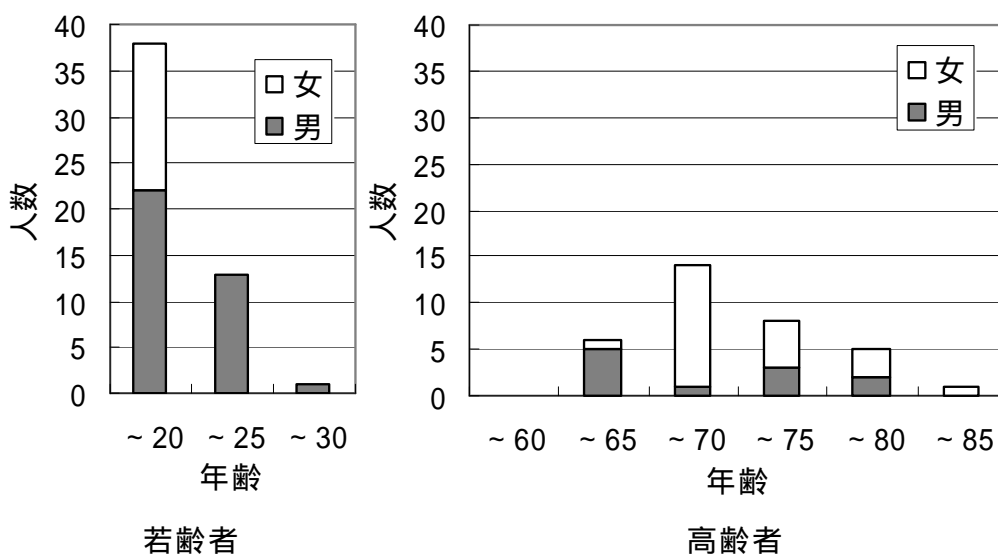


図 2.31 被験者の年齢分布

表 2.10 実験に使用した背景と文字の色の組み合わせ

組み合わせ No.	背景色	文字色
	白	黒
	白	赤
	赤	白
	赤	黒
	黒	赤
	白	青
	青	白
	青	黒
	黒	青

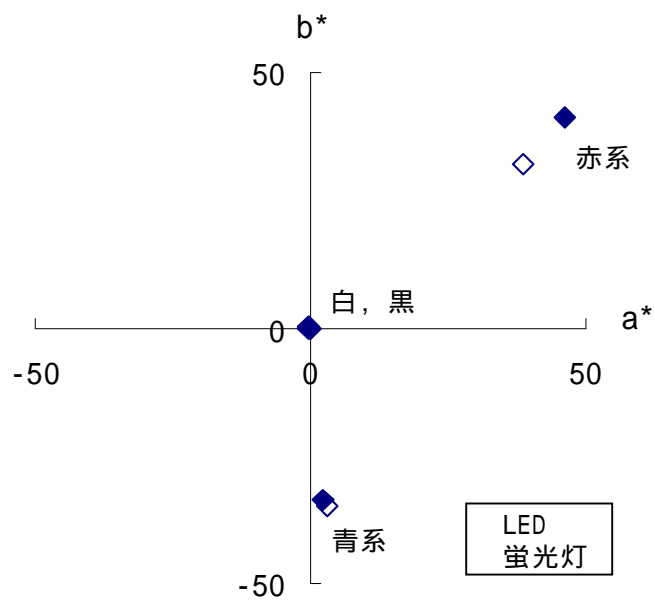
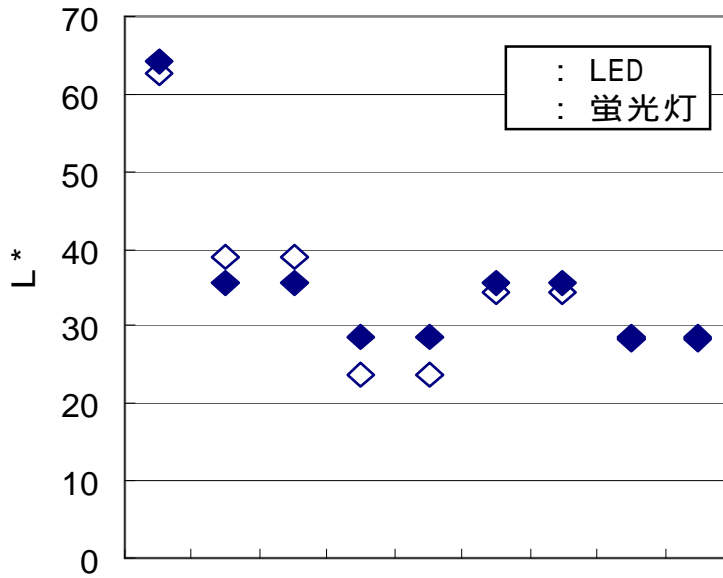


図 2.32 実験に使用した色の照明下での a^*b^* 値



色の組み合わせ

図 2.33 実験で使した色の組み合わせの背景と文字の明度差 L*

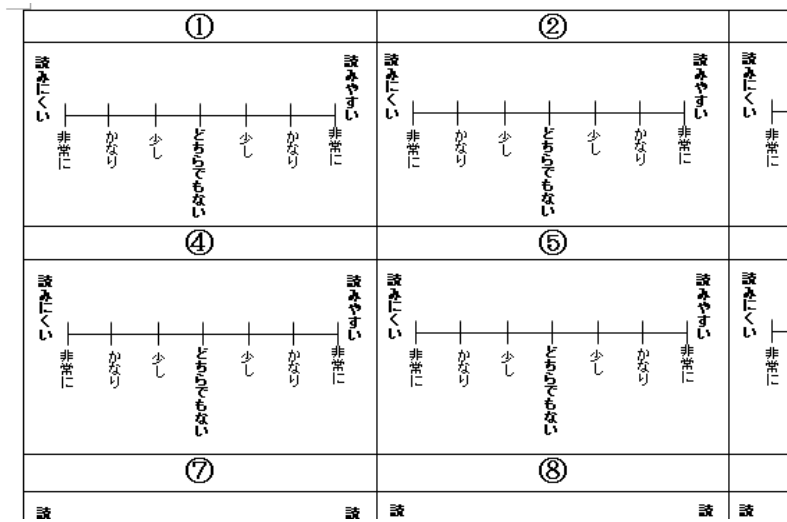


図 2.34 読みやすさの評価尺度

2.3.4.5 実験結果

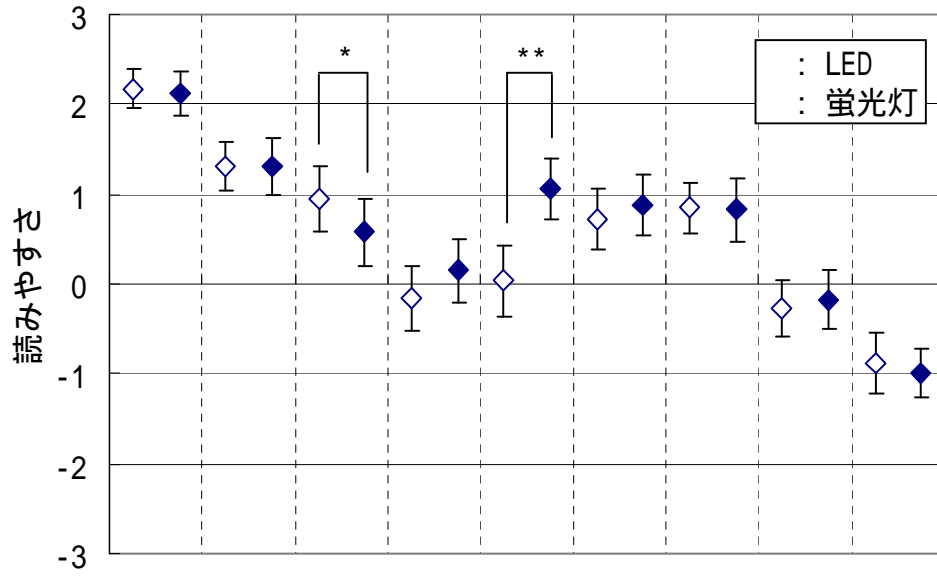
若齢者の可読性の評価結果を図 2.35 に示す。エラーバーは 95% 信頼区間である。組み合わせ（黒色背景に青文字）に対する評価が低く、白黒の組み合わせの評価が高かった。

照明による可読性の違いは組み合わせ、において見られ、とでは t 検定によって統計的有意差が認められた。これは図 2.33 に示した背景と文字の明度差 L^* が照明によって違いが生じる組み合わせとほぼ一致する。（黒色背景に赤文字）においては照明による評価の違いが最も大きく見られた。

L^* と読みやすさ評価の関係について図 2.36 に示す。 L^* と可読性評価の一致性が見られる ($R^2 = 0.66$) が、（背景黒・背景青）は L^* に対する評価が他の組み合わせよりも低くなっていることがわかった。若齢者において色の組み合わせによる可読性の違いは 以外は照明による影響も含め、 L^* によって説明できると考えられる。

次に高齢者による評価結果を図 2.37 に示す。エラーバーは 95% 信頼区間である。高齢者は若齢者に比べ、個人によるばらつきが大きい。これは視覚の加齢変化に個人差が大きいためであると考えられる。高齢者における可読性評価結果は と が低く、これはどちらも背景が黒色で文字が有彩色であった。また、次に と に対する評価があまり高くなく、これは有彩色背景に文字が黒色の組み合わせであった。それに対し、白色との組み合わせに対する評価が良かった。これは図 2.33 に示したように黒色との組み合わせでは背景と文字の L^* が比較的小さく、さらに背景が黒色の場合、高齢者の可読性は低下することを示している。チャートの全体的な輝度レベルが低いことが関係していると考えられる。

次に背景と文字の L^* に対する可読性評価の結果を図 2.38 に示す。赤や青と無彩色を使用した色の組み合わせの場合、可読性は L^* との相関は低かった。黒色との組み合わせにおいて評価が低く、白色との組み合わせにおいて評価が高くなっており、そのため図 2.30 で見られたような明度差に対する可読性の相関は低くなった。



色の組み合わせ * : $p < 0.05$

図 2.35 若 齢 者 の 色 の 組 み 合 わ せ に 対 す る 読 み や す さ ** : $p < 0.01$

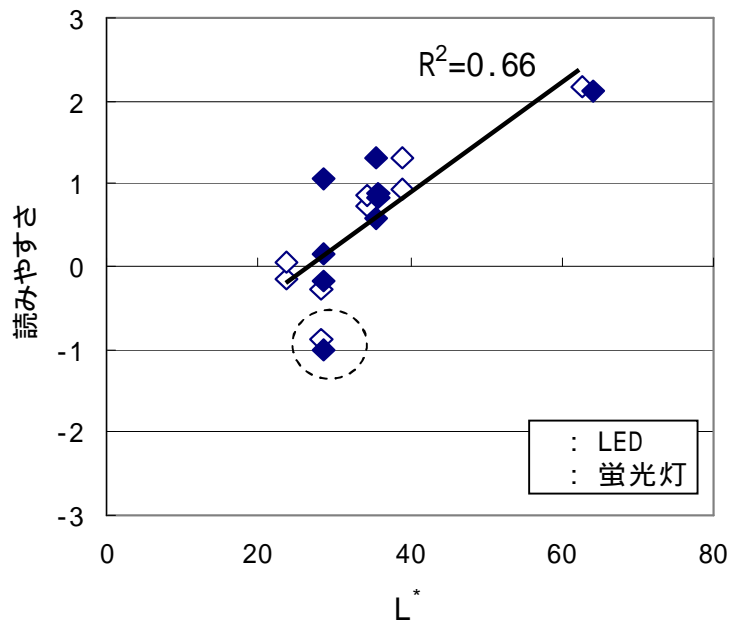
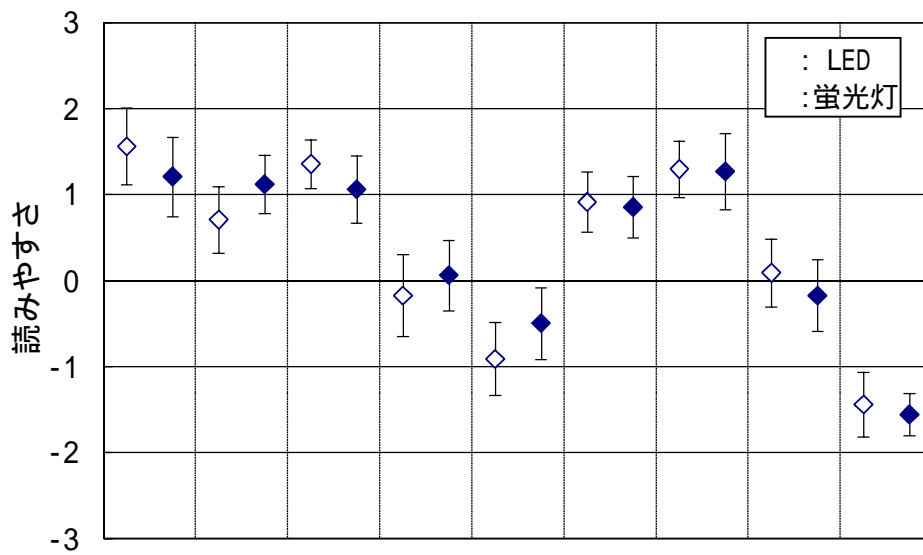


図 2.36 若 齢 者 の 背 景 と 文 字 の L^* に 対 す る 読 み や す さ



色の組み合わせ

図 2.37 高齢者の色の組み合わせに対する読みやすさ

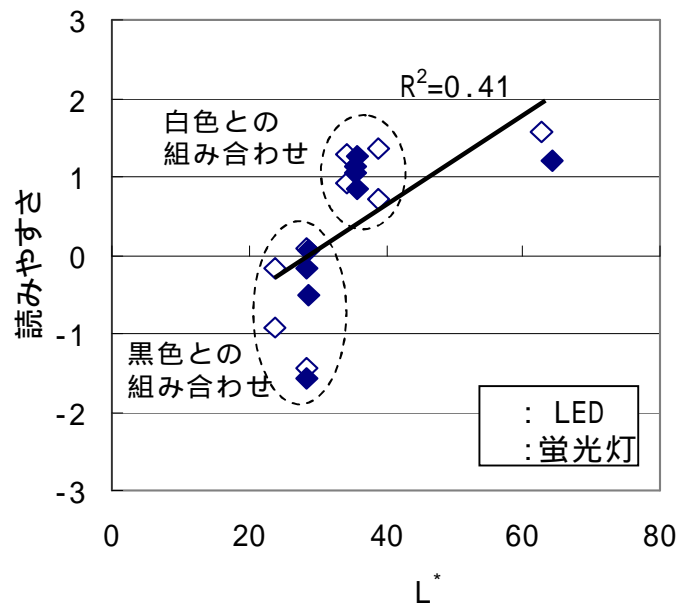


図 2.38 高齢者の背景と文字の L^* に対する読みやすさ

2.3.5 考察

本研究において設定した紙上のような条件範囲においては背景と文字の色の組み合わせに対する可読性はほとんどの場合、背景と文字の明度差によって説明できた。ただし、黒色背景に青文字の場合は明度差から予想されるよりも可読性が低くなった。本研究における文字列幅は視角 3~4 度、1 文字は視角 0.3 度程度であり、青色と黒色の組み合わせは人間の中心窩に S 錐体の分布が非常に少ない²⁴⁾ ために解像度が悪く、可読性が低くなったと考えられる。

高齢者においても同様に多くの場合、可読性は明度差によって説明できたが、図 2.38 に見られる赤色や青色を使った色の組み合わせにおける明度差と可読性の不一致性は、加齢による短波長光や長波長光に対する相対的な感度低下が原因と考えられる。高齢者は赤と青に対しては測定値から得られる値よりも感じられる明度が低くなり、黒色との組み合わせにおいては明度差を小さく、白色との組み合わせにおいては明度差を大きく感じているのではないかと考えられる。加齢に伴う感度低下による実際に見えている明度の変化は可読性に大きく影響を与えていると考えられる。

2.3.6 まとめ

本項の研究において、店舗照明を想定した蛍光灯と LED の比較を行った結果、通常使用しているような条件では照明による大きな可読性への影響は見られなかった。しかしながら色の組み合わせの種類によっては、同じ照度設定を行った場合でも照明の分光スペクトルの違いにより、多少の影響が確認された。これは分光スペクトルの違いによる色彩対象に対する明度の現れ方の違いによると考えられ、ほとんどの場合、使用照明下での文字と背景の明度差によって可読性が説明できることを示した。しかしながら高齢者の場合、短波長側と長波長側に起こっていると考えられる加齢による明るさ分光視感効率の低下が可読性に影響を与えることが考えられ、使用する色によっては、照明下での明度差のみによって可読性は説明できないことがわかった。

高齢者を対象とした場合、使用照明下での明度差と使用色に対する明るさに対する感度を複合的に考慮していく必要があると考えられる。

2.4 色の目立ちに対する相関色温度の影響

2.4.1 はじめに

自動車においては、燃費の向上や電気自動車のバッテリー負荷低減のため、使用電力の低減を目的とした照明のLED化が進んでいる。自動車用インテリア照明は照度レベルが低いことから機能性に対して厳しい条件であり、LEDには既存光源と同等以上の品質が要求される。自動車インテリア照明の中でルームランプは一般的にドア開閉と連動する場合や、ユーザーが自由に点灯することによって車内を広く点灯するように作られており、使用頻度が最も高い照明である。そこで本研究ではルームランプのLED化における機能性検討を行った。

ルームランプの設計要件として照度と照明範囲は要求されるが、照明光源が異なる場合は見え方が異なるため、使用時において、同じ照度であっても満足度は異なる可能性がある。LED照明を使ったより良い設計のためにはユーザーニーズからの要求事項を明確にし、それに対しての機能性を満足させる照明特性を明確にする必要がある。

さらに使用するユーザーの視覚の特性が見え方に大きく影響する。加齢による視覚の変化は大きく、照明の機能性の検討にはその影響を検討することが非常に重要である。

2.4.2 使われ方の明確化

自動車のルームランプの要求事項を調査するため、アンケートを実施した。

166名の自動車を使用している男女を対象に「どのような時にルームランプを使用しますか（複数回答可）」と質問した結果を図2.39に示す。

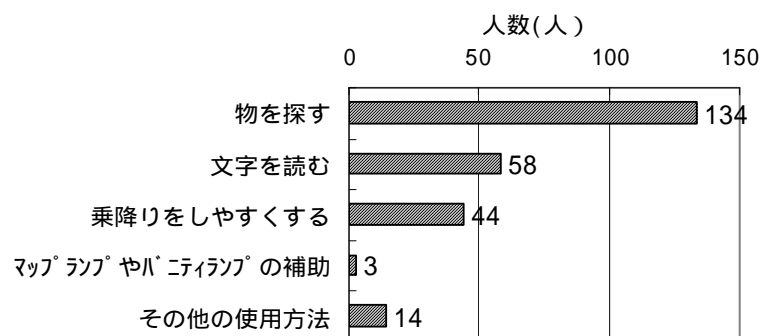


図 2.39 ルームランプの使用方法アンケート結果

アンケートの結果，ルームランプは車内の物を探す際に使用される場合が多いことがわかった．つまり，シート等の上にあるものがすぐ発見できるかどうかが重要となる．そのため，色の見えがルームランプの機能として重要項目の一つと考え取り上げることとした．

現在流通している多くの自動車の室内照明は白熱電球が使用されており，その平均演色評価数：R a は 100 である．しかしながら，日常生活において使用する場合には白熱電球下や色温度が低い照明下での色の見えは必ずしも良くないことが報告されている²⁾²⁵⁾．

自動車の室内照明のように照度が低い条件ではハント効果としてよく知られているようにクロマ知覚が低下することがわかっている²⁶⁾が，照度の低下に伴う色の見えの低下度合いは光源種によってどの程度異なるのかは明確でない．

また R a は色再現性を表す指標であり，基準となる試験色から鮮やかに見える方にずれても値が低くなる²⁷⁾．L E D は白熱電球と全く異なる分光特性をもっており，R a では色の見えを表しにくいとして C I E（国際照明委員会）や研究機関で検討がなされている²⁸⁾．

さらに L E D を適用することで電球色以外の色温度の照明が可能になるが，色温度が異なる照明の R a は比較できない．

本研究では以上のことを踏まえ，自動車用ルームランプを想定した色の見えについて白熱電球と相関色温度条件を変えた L E D 照明の比較実験を行い，自動車照明における L E D 照明のあり方について検討を行った．

2.4.3 実験方法

2.4.3.1 色の見えの指標

色の見えを表す指標の一つとして「色の目立ち」がある²⁹⁾．橋本らは等目立ち感照度から，色の明瞭性を表す目立ち指数を提案している³⁰⁾．実験方法として，橋本らの用いた 4 色色票による目立ち感評価方法を採用し，等目立ち感照度の低さによって色の目立ちを比較した．

2.4.3.2 実験に使用した照明

基準用に白熱電球を使用した。また各照明の照度分布を均一にするため拡散シートを用いた。実験照明の特性は表 2.11 の通りである。また、分光スペクトルを図 2.40～2.43 に示す。

表 2.11 実験に使用した照明の特性

サンプル	色温度 (K)	R a
電球色相当 L E D	2700	73
温白色相当 L E D	3400	70
昼光色相当 L E D	6100	65
白熱電球	2600	99

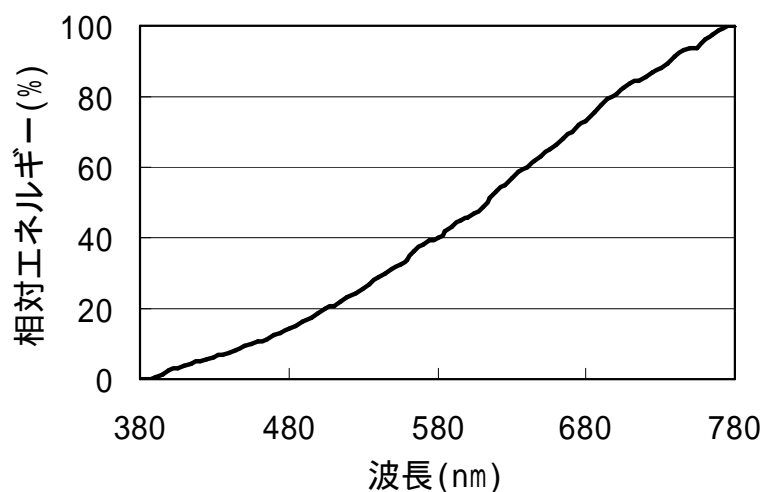


図 2.40 白熱電球の分光スペクトル

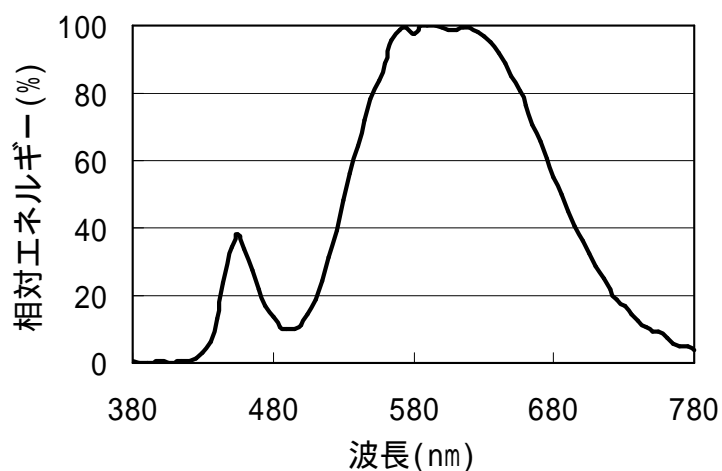


図 2.41 電球色相当 L E D の分光スペクトル

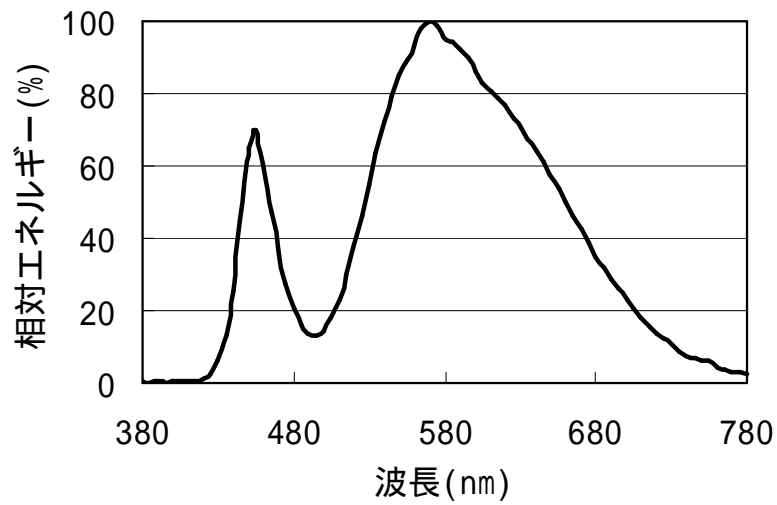


図 2.42 温白色相当 LED の分光スペクトル

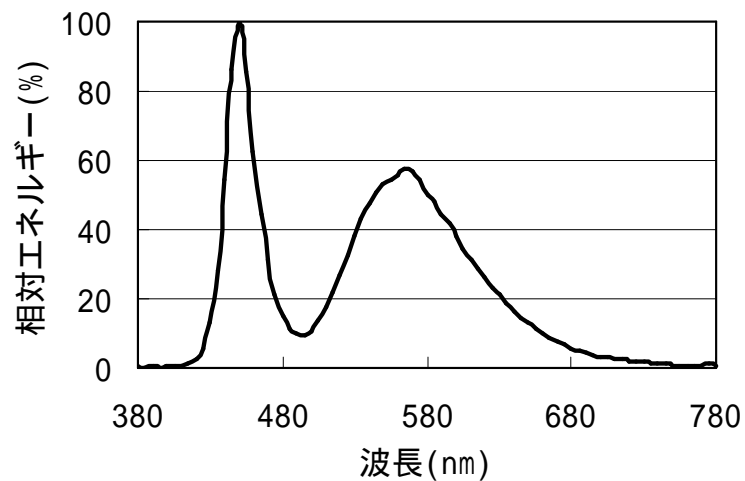


図 2.43 昼白色相当 LED の分光スペクトル

2.4.3.3 手法

白熱電球を基準として LED 照明の等目立ち感照度を求める実験を行った。図 2.44 に実験レイアウトを示す。外光を遮断した暗室の中に設置した 2 つの暗箱の一方を白熱電球で照明し、もう一方の箱を LED 照明で照明した。白熱電球で照明された暗箱の観察面の平均照度をルームランプ照明下における車内座席上に相当する 10 [lx] に設定した。手元のダイヤルを回転させ、LED 照明の照度がパルス調光により変化できるようにした。

各暗箱内には図 2.45 に示した 4 色色票を呈示した。

色票の色は特殊演色評価数 R 9 , R 1 0 , R 1 1 , R 1 2 の試験色に近似した 4 色を使用した。色票は自動車のシートの素材であるセミアニリン革上におき、シートの色による違いを見るためにシート色は以下の 2 種類を使用した。色票のマンセル計測値は表 2.12 の通りである。

- ・ 黒革 (マンセル値 6.3PB2.3/0.3)
- ・ 白革 (マンセル値 3.1Y6.5/0.9)

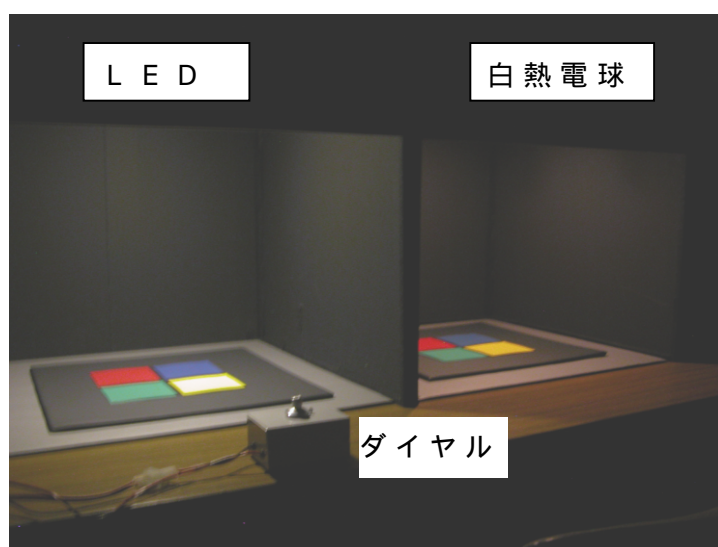


図 2.44 実験レイアウト

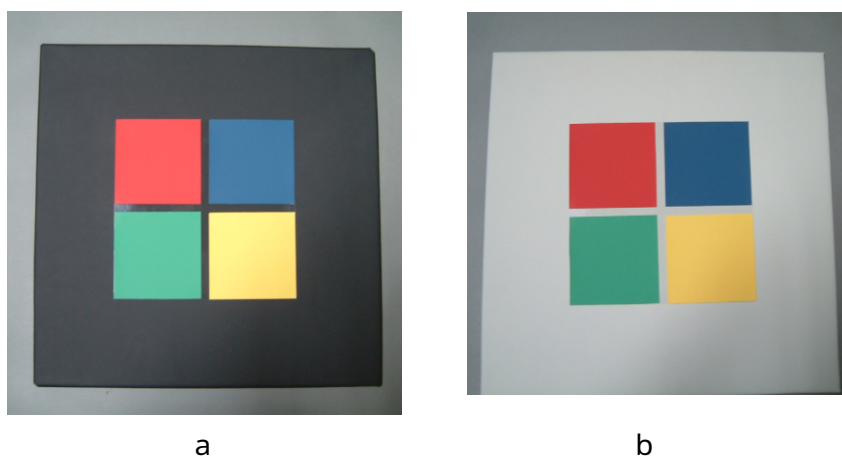


図 2.45 実験用色票 (a : 黒革上 , b : 白革上)

表 2.12 色票の色測定値

色	マンセル値
赤	5.1R3.5/10
黄	4.1Y7.5/9.3
緑	6.6G4.5/6.4
青	4.0PB2.8/5.2

被験者は4色全体の色の目立ち感が白熱電球で照明された場合と同等になるようダイヤルでLED照明の照度を調整し、求めた照度をLED照明の等目立ち感照度とした。調節の方向は下降系列とした。LED照明3種類に対し、それぞれ実験を行い、その実験順序は被験者ごとにランダムとした。

2.4.4 被験者

19歳から77歳の男女88名で実験を行い、実験上の異常値と石原式色覚異常検査表(株式会社半田屋商店版)で3色覚であることを確認した74名のデータを抽出した。

被験者の視力矯正は読書以外の通常生活をする状態とした。

被験者74名の年齢分布を図2.46に示す。

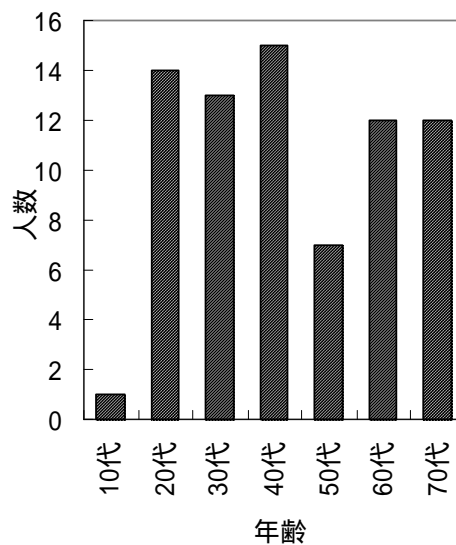


図 2.46 被験者の年齢分布

2.4.5 実験結果

2.4.5.1 LEDの色温度、背景による目立ち感

74名の被験者について、白熱電球 10[lx]に対するLED照明3種の等目立ち感照度平均値を図2.47と図2.48に示す。電球色、温白色は白熱電球と等目立ち感照度が同等であったことから、色の目立ち感も同等であった。昼光色相当（以下昼光色とする）は白熱電球に対し、10%程度高い照度を必要とし、統計的有意差が見られた（z検定： $p < 0.01$ ）ことから目立ち感がやや低いことがわかった。

LED照明同士の比較においても昼光色と他の色の差には統計的有意差が見られた（Tukeyの多重比較）。背景の色による違いは見られなかった。

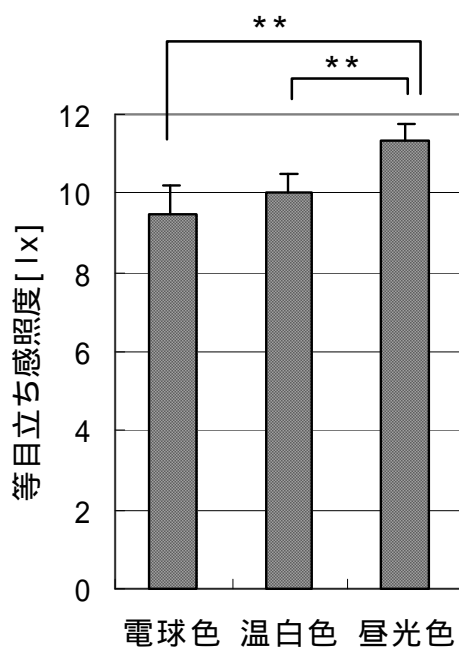


図 2.47 白熱電球 10[lx]に対する等目立ち感照度

（黒革上） ** : $p < 0.01$

エラーバーは 95% 信頼区間

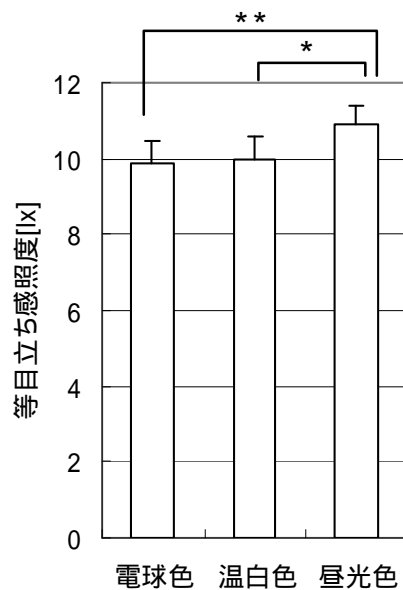


図 2.48 白熱電球 10[lx]に対する等目立ち感照度

(白革上)

** : $p < 0.01$

* : $p < 0.05$

エラーバーは 95% 信頼区間

2.4.5.2 被験者の年齢による違い

年齢による違いを見るため被験者を 30 歳未満 (15 名), 30 歳 ~ 50 歳未満 (28 名), 50 歳以上の 3 群 (31 名) に分けて平均値を求めた。被験者年齢群ごとの LED 照明下での目立ち感評価結果を図 2.49 ~ 2.51 に示す(エラーバーは 95% 信頼区間, * : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$)。

30 歳未満の若齢者においては色温度による傾向は見られず白熱電球と LED 照明の目立ち感は同等と感ずることがわかった。また背景の色も関係がなかった。

30 歳から 50 歳未満の被験者はやや色温度による傾向を示し, 電球色や温白色の LED 照明では白熱電球と同程度の目立ち感であったが昼光色の場合は必要照度がやや高くなり目立ち感が低く感じることを示した。

黒背景では白熱電球に対して有意 (t 検定 : $p < 0.05$)

に照度を必要とし, 電球色 LED に対しても有意 (tukey の多重比較 : $p < 0.05$) に照度を必要とした。

50 歳以上の被験者では, さらに昼光色 LED 照明に対する必要照度が高くなり, 白熱電球に対して背景色に関わらず必要照度が高かった (t 検定 : $p <$

0.01)。また他の色に対しての差が大きくなった。

黒背景の方が色温度による影響が大きく現れ、電球色において白熱電球よりも必要照度が低く（t検定： $p < 0.05$ ）、目立ち感が高い結果となった。

以上の結果から加齢に従って、照明の色温度による目立ち感への影響が大きくなるとともに背景色によって効果の大きさが異なることがわかった。

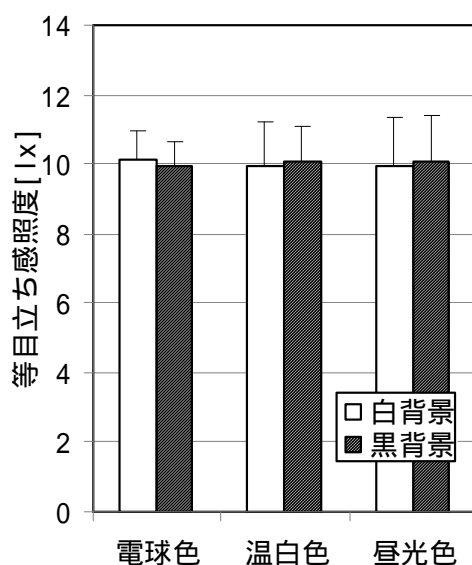


図 2.49 30 歳未満の被験者の等目立ち感照度

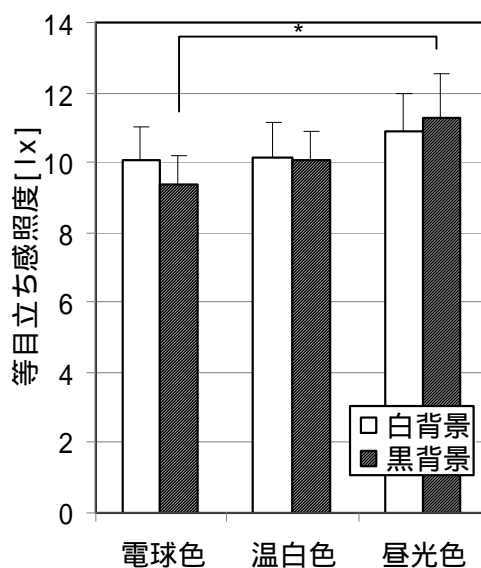


図 2.50 30 歳～50 歳未満の被験者の等目立ち感照度

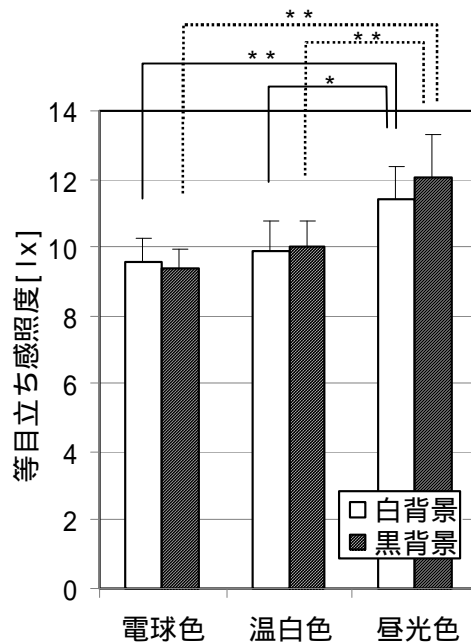


図 2.51 50 歳以上の被験者の等目立ち感照度

2.4.6 考察

加齢による眼の水晶体の黄変化により短波長光の感度が低下することがわかっている⁶⁾。図 2.41～図 2.43 に示したように，照明は色温度が高くなるにつれ，短波長側の分光成分が増加するため，黄変化が進んだ水晶体では透過するエネルギーの減少割合が大きいことが考えられる。以上のことから高齢者は昼光色で色の目立ちが比較的 low 感じられたと考えられる。

図 2.50 のように 30 歳以上 50 歳未満の中年層においてすでに色温度による傾向が見られる。図 2.52 に示した，(社)自動車工業会の調査による自動車ユーザーの年齢分布では 30 歳以上が 90% を占めている。このことを考慮するとほとんどのユーザーが色温度の影響を受けると考えられる。

また，色温度に対する影響が黒背景の方が大きい傾向が見られたのは，明度対比によって色温度による目立ち感の影響がよりはっきり現れたためと考えられる。

電球色 LED において，年齢が高いと白熱電球よりもやや目立ち感が高くなった理由については LED が中波長域の分光成分が比較的多いからであると考えられるが，今後精査が必要である。

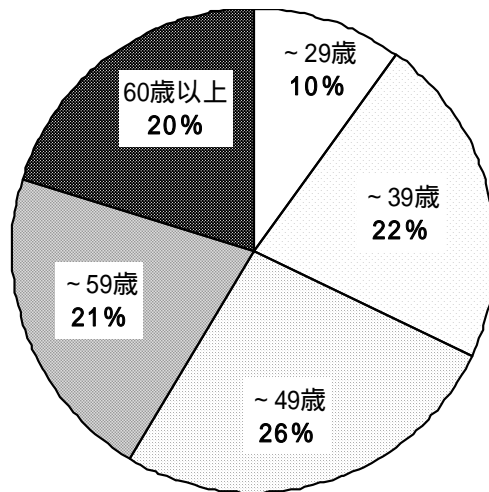


図 2.52 主運転者の年齢分布³¹⁾

2009 年度調査結果 (n = 2,687)

2.4.7 まとめ

自動車のルームランプを対象にして ,図 2.40 ~ 2.43 に示される分光特性を有する L E D 照明の色の見え (目立ち) について実験を行い , 以下のことを明らかにすることができた .

- ・ 自動車のルームランプのような使用条件における L E D 照明下での色の目立ちは電球色相当、温白色相当では白熱電球と同等であり , 昼光色相当ではやや低い
- ・ 若齢者は色の目立ちに光源種や色温度 , 背景色は関係ない
- ・ 加齢によって , 色の目立ちには色温度が影響することがわかった . L E D の電球色は白熱電球と同等以上 , 温白色は同等、昼光色はやや低くなる

以上より , L E D 適用において照明品質のうち色の見えを確保するためには , 色温度と照度設定とのバランスを考えた設計が必要であることがわかった .

2.4.8 おわりに

本研究では自動車用照明を対象とし , 低照度条件であることや色温度が異なる照明の比較を行うことを踏まえ , 演色性について色の目立ちを一つの指標として検討した . このような平均演色評価数 : R a を目安にできない場合における指標についての今後の検討が必要であると考えられる .

2.5 色弁別性に対する分光分布、色温度の影響

2.5.1 目的

LED照明を工場用照明として使用する場合は検査工程での不良の見わけやすさが照明品質の重要点の一つとなる。すでに工場においても省エネ観点から蛍光灯に変わってLED照明の設置が拡大しているため、検査工程においてもLED化が進んでいるのが現状である。

LED照明は蛍光灯と比較して分光分布が大きく異なるため、色の見え方に違いがあることがわかっている³²⁾。色の見え方の違いは色差の認識にも影響を与えることが考えられる。検査においては色の微妙な違いを見分けることが求められており、より精度が上がる照明条件が求められている。

本研究ではLED照明と蛍光灯下での色弁別について年齢層の広い被験者を使った実験を行い、光源の違いによる照明環境が実用上の課題となりうるかについて検討を行った。

2.5.2 実験用照明

実験に使用した照明は通常工場の検査工程で使用されることが多い昼白色を取り上げた。これを第一実験とする。加えて第二実験として光源色の違いによる影響があるのかについて昼光色の検討を加えた。

第一実験での使用照明は以下の通りである。

表 2.13 第一実験の照明仕様

	相関色温度	平均演色評価数 Ra
蛍光灯タイプLED	5800K	76
3波長形蛍光灯	4900K	81

それぞれの分光分布を図 2.53, 図 2.54 に示す。

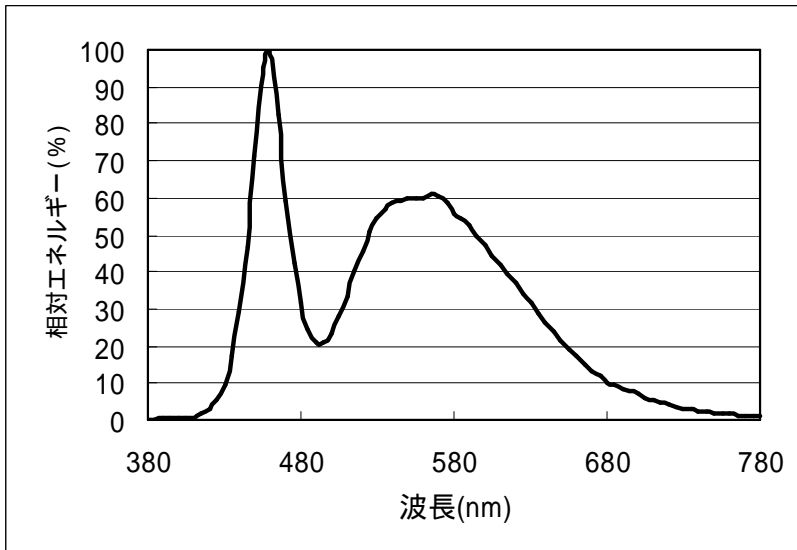


図 2.53 昼白色 L E D 照明の分光分布

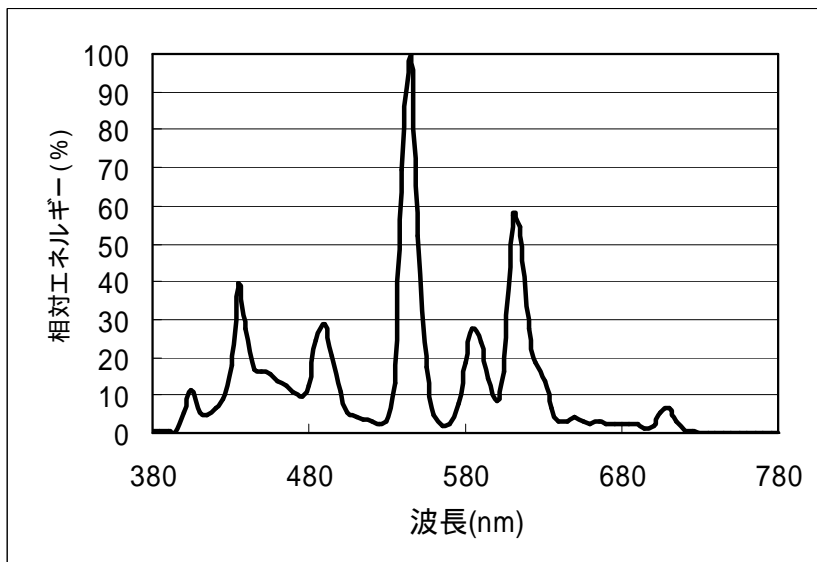


図 2.54 昼白色 3 波長形蛍光灯の分光分布

第二実験では昼光色を狙いとした照明で比較を行った。使用光源は表 2.14 の通りである。

表 2.14 第二実験の照明仕様

	相関色温度	平均演色評価数 Ra
蛍光灯タイプ L E D	7800K	82
3 波長形蛍光灯	6800K	82

それぞれの分光分布を図 2.55 , 図 2.56 に示す。

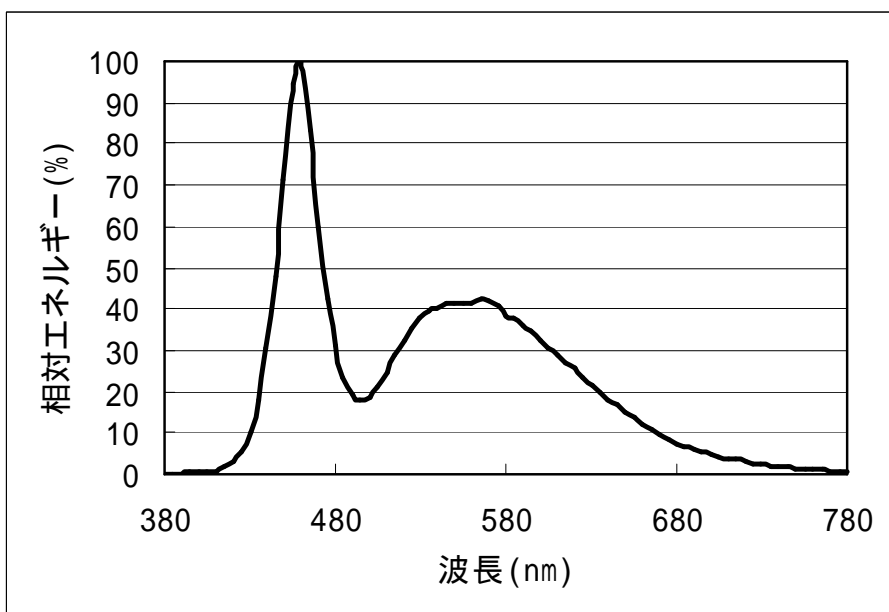


図 2.55 昼光色 L E D 照明の分光分布

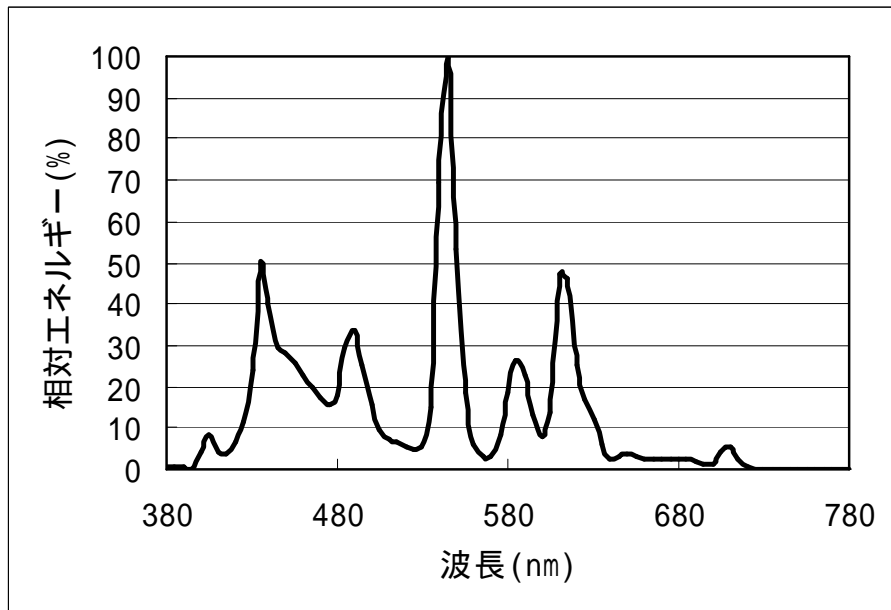


図 2.56 昼光色 3 波長形蛍光灯の分光分布

実験では 2 つの照明それぞれを観察ボックスの中に設置し，照明光源が直接目に入らないように目の高さにカバーを取り付けた．観察面 400mm × 400mm の平均照度（5 点法）が同じ照度（900 [lx]）になるよう明るさを調整した．観察面となる机上面は反射率 18% のグレーの紙をおき，壁は黒い暗幕を設置した．図 2.55 に照明を設置した観察ボックスの写真を示す．

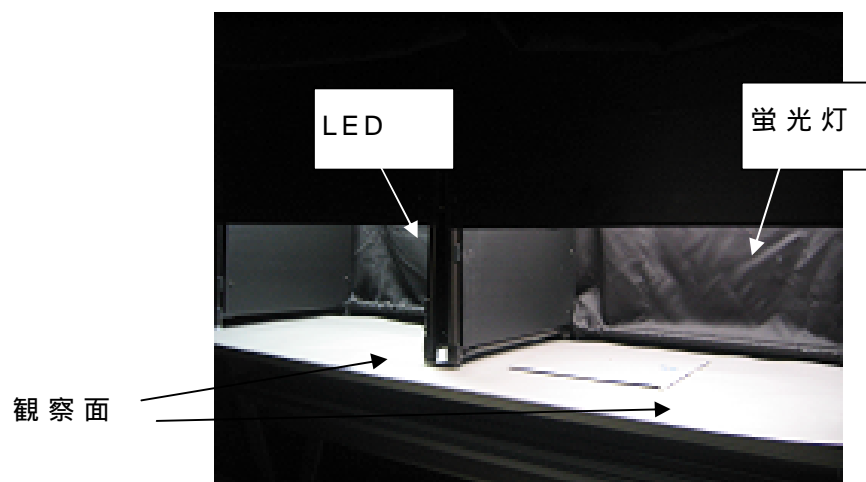


図 2.55 観察ボックス

2.5.3 実験方法

照明下での物体色の色差弁別を計測する方法として基準の色票に対し，比較色票を色差が大きい物（色差が明らかに認識できる物）から徐々に色差の小さい物に向かって連続呈示し，色の違いがわからなくなった色票間の色差（ E^*_{ab} ）を弁別閾とした．

対象色は赤，緑，青とし，それぞれの色に対して他の色成分が混入した場合についての弁別閾を求めることとした．図 2.56 に実験用色票の写真を示す．基準色票を固定し評価色票を変更して，1枚ずつ連続的に呈示できるようにした．

被験者はLED，蛍光灯それぞれの照明下のグレー机上面を1分ほど見て色順応した後，実験を開始した．

実験順序によるデータへの影響を考慮し，被験者ごとに照明の順番を変え，呈示色はランダムに行った．

2.5.4 実験用色票

コピー用紙に印刷したものを色票とした．

PC上カラーパレット（図 2.57）によってR，G，Bそれぞれ100%（設定値 255，0，0/0，255，0/0，0，255）のものを基準色票とし，評価色票はRにはBかG，GにはRかB，BにはRかGを混色して作成した．色票のイメージを表1に示す．この方向は色差が小さくなる方向である．

2つの色票を同時に観察した時に2度視野内に入るように色票は15mm×15mmで作製した．

第一実験では評価色票はそれぞれ基準の色票に対する E^*_{ab} の計測値が0から約20までの範囲でなるべく等間隔に22枚用意した．コニカミノルタ分光色彩計CM-500で測定した基準色票に対する評価色票の E^*_{ab} を図2.58に示す．

第二実験では第一実験よりも細かくなるように E^*_{ab} の計測値が0から約10までの範囲でなるべく等間隔に23枚用意した．図2.59に基準色票に対する評価色票の E^*_{ab} を示す．

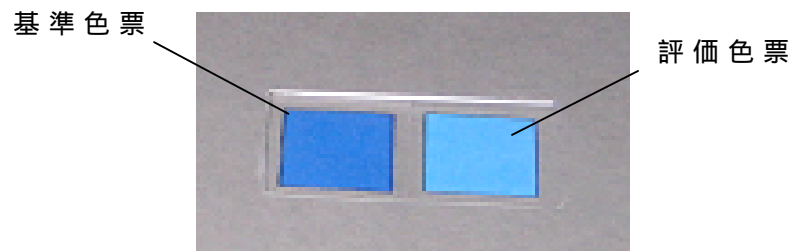


図 2.56 実験用色票



図 2.57 カラーパレット

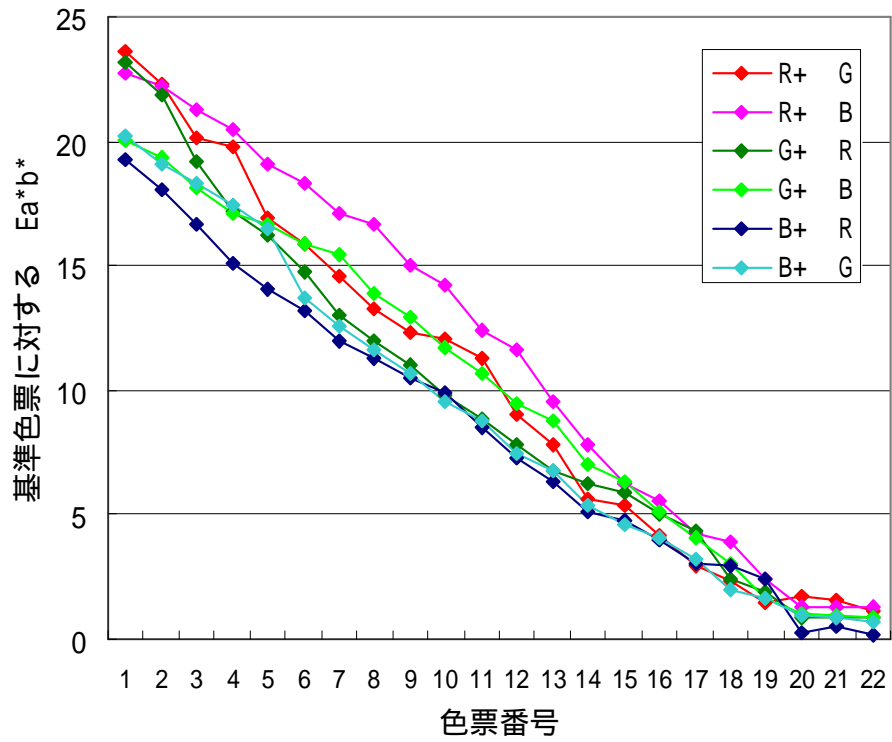


図 2.58 第一実験用評価色票の E^*_{ab}

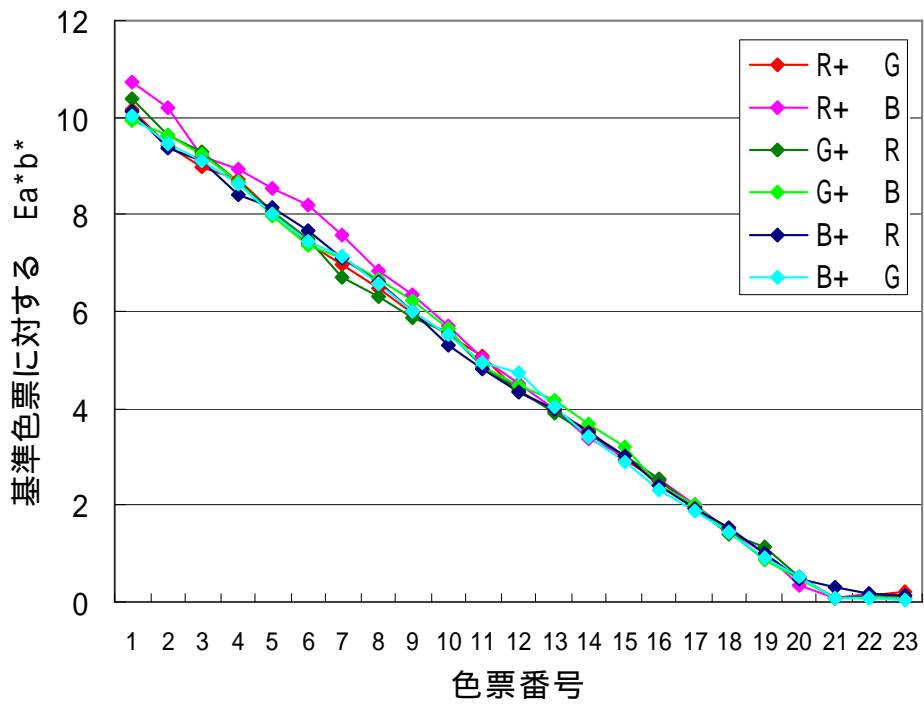


図 2.59 第二実験用評価色票の E^*_{ab}

2.5.5 結果と考察

2.5.5.1 第一実験

48名の被験者で実験を行った。被験者の年代は表 2.15 の通りである。

表 2.15 被験者の人数

	男性	女性
20 歳代	8	2
30 歳代	4	1
40 歳代	4	10
50 歳代	1	2
60 歳代	3	6
70 歳代	5	1
80 歳代	1	0

被験者 48 名のうち、ワード法によるクラスタ分析を行ったところ少数の色弁別閾が明らかに大きな被験者が 9 名いた。残りの 39 名の被験者で色弁別閾を平均して求めることとした。

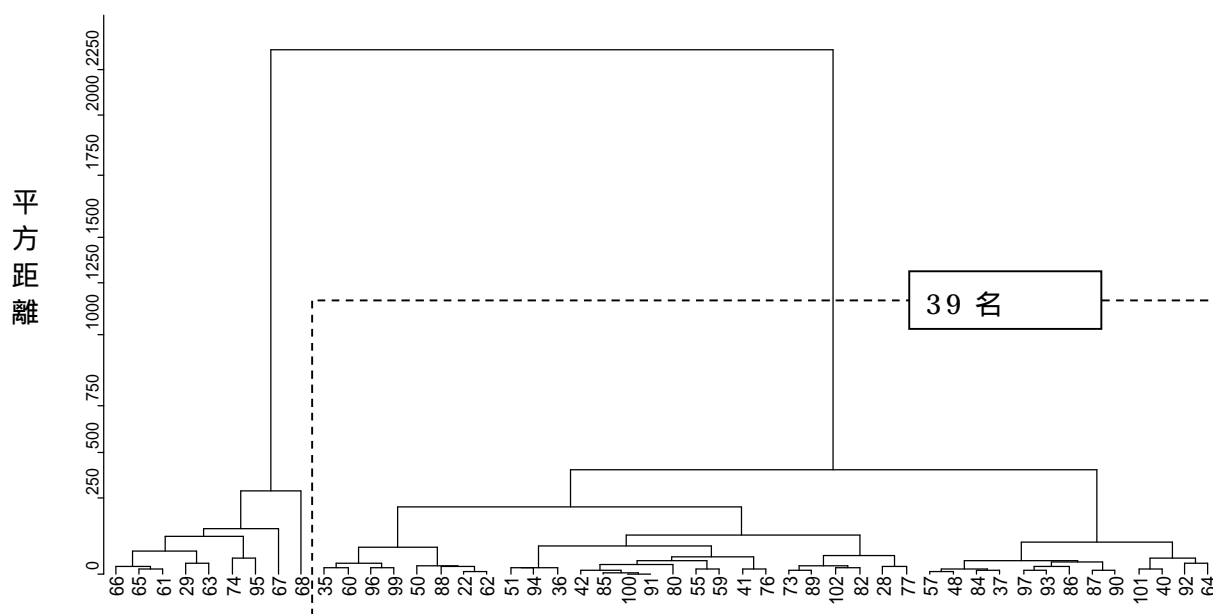


図 2.60 被験者のクラスタ分析結果

(番号は実験時の被験者番号)

スクリーニングした 39 名の被験者の年代による人数と性別分布は図 2.61 の通りである。

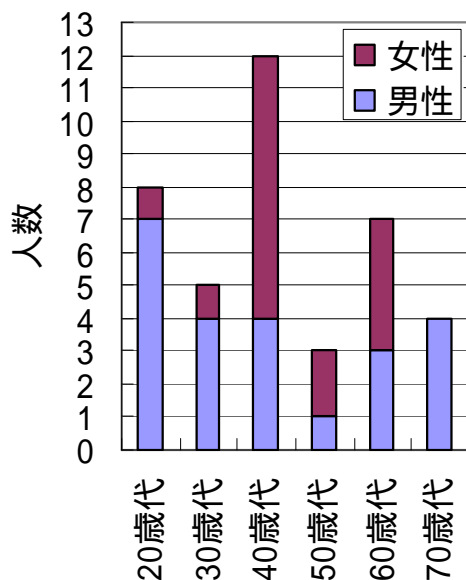


図 2.61 被験者の年代ごとの人数

基準色票に対して違いのわからなくなった評価色票の基準色票に対する色差 E^*_{ab} を色弁別閾として、照明の違いと男女の違いを比較した結果を図 2.62 に示す。

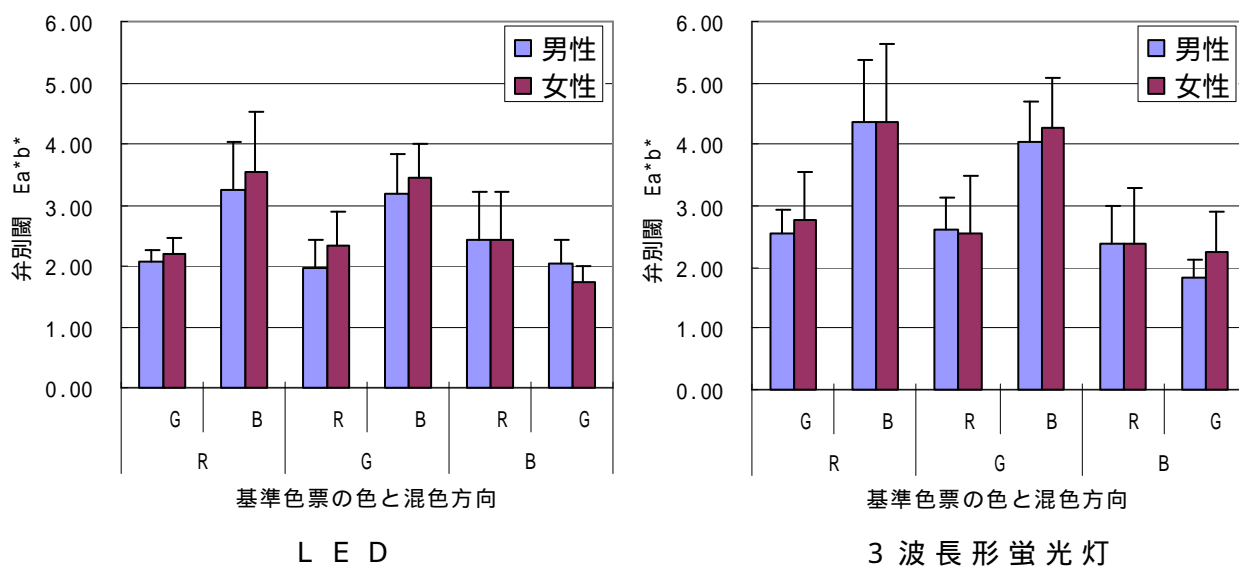


図 2.62 LED照明下と蛍光灯下での色票による色弁別

同じ色票を使った実験においてLED照明下の方が E^*_{ab} の小さい色票まで見わけることができたことがわかった。表 2.13 に示したようにLEDの方が演色評価数 Ra は低い。このことから、色差弁別と Ra は関係性が低いことが示された。

男女に差異は認められなかったため、男女合わせたの平均値でLEDと蛍光灯の E^*_{ab} を比較した結果を図 2.63 に示す。色差弁別閾は E^*_{ab} で 2~4 程度であった。R+ B や G+ B の値が比較して高く、青色成分が混入する場合やや見わけにくいことが示された。

蛍光灯よりLEDの方が小さい E^*_{ab} まで見わけられる傾向があったが、青色色票の場合は照明の種類による影響は見られなかった。t 検定を行ったところ、赤色色票と緑色に青色成分が混入した場合について、統計的有意差が見られた。

照明の違いによって同じ色票の色差が大きく見えたり、小さく見えたりすることがわかった。

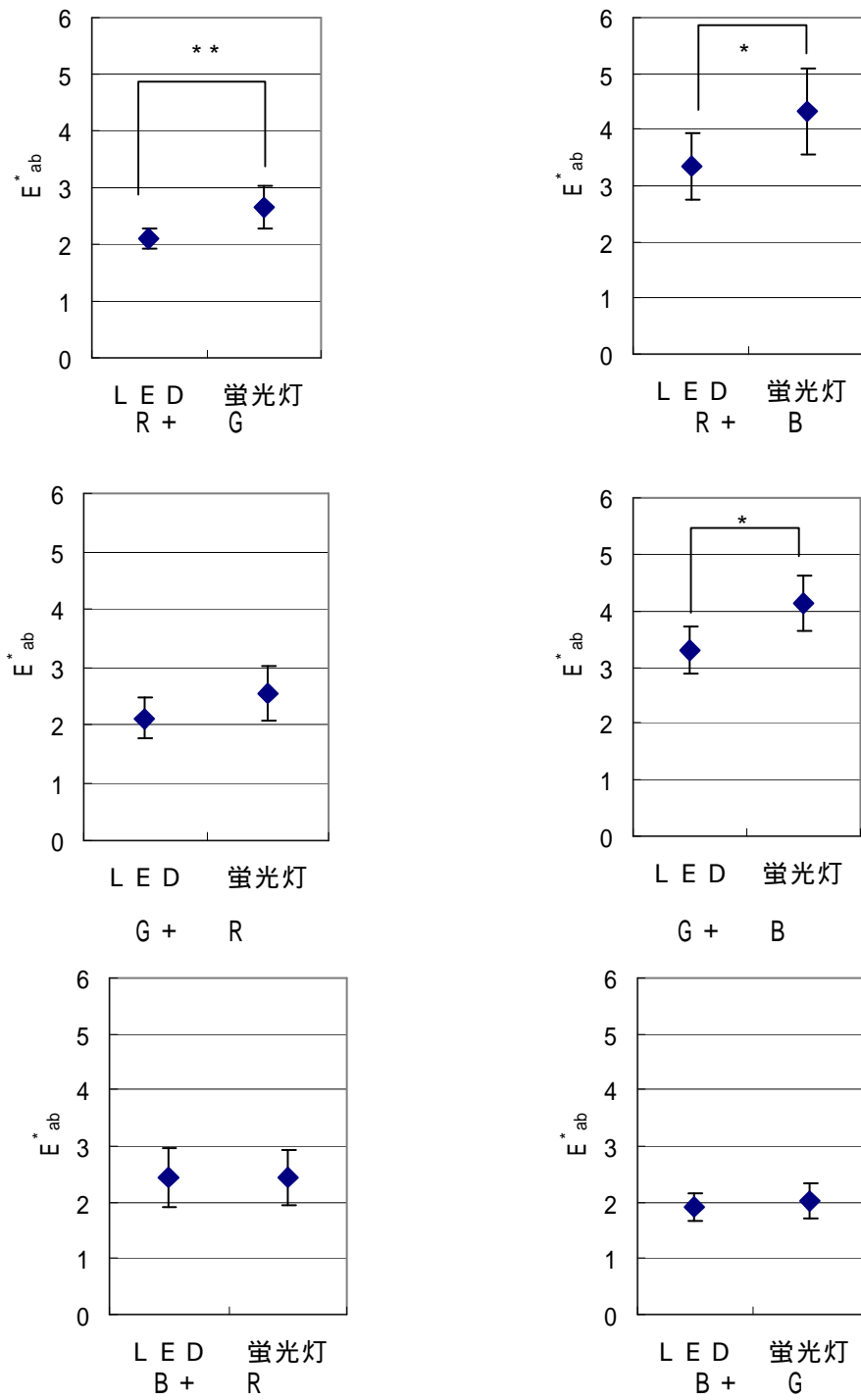


図 2.63 同じ色票での L E D 照明下と蛍光灯下での色弁別閾

エラーバーは 95% 信頼区間

** : $p < 0.01$

* : $p < 0.05$

被験者の年齢による傾向について検討した。下記に図 2.63 で差が見られた色について 40 歳以下の被験者と 60 歳以上の被験者を比較した。結果を図 2.64 に示す。統計的有意差はなかったものの、高齢層の方が E^*_{ab} は大きく、加齢によって色弁別能力が低下する傾向が見られた。若齢層では照明による差がほとんどないが高齢層に照明による差が大きい傾向が確認できた。色差弁別における照明光源の違いは高齢層に対して影響が大きいと考えられる。

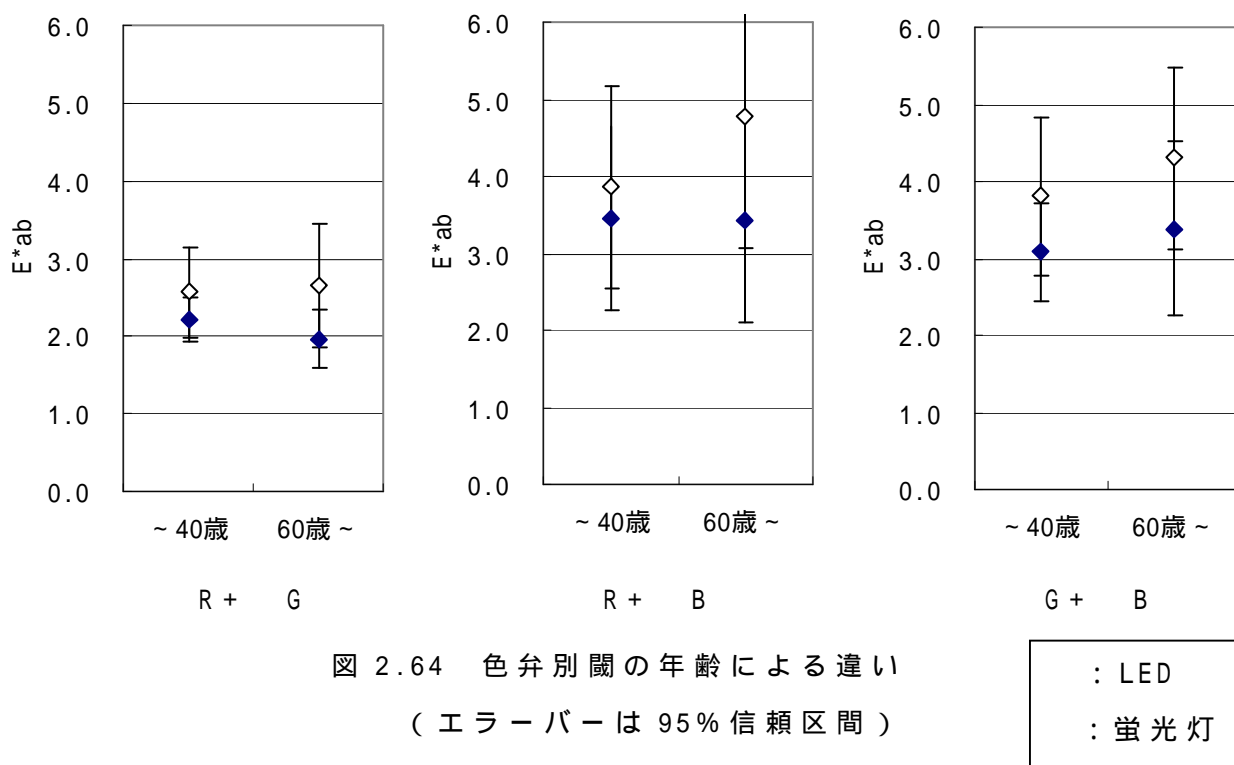


図 2.64 色弁別閾の年齢による違い
(エラーバーは 95% 信頼区間)

◇ : LED
● : 蛍光灯

加齢による弁別閾の拡大傾向において、被験者の眼の白濁度の影響を見た。図 2.64 に示す。左右の眼の白濁度の平均値で被験者を分類し、白濁度が 60 未満の被験者と 100 以上の被験者の平均値を比較した。青色成分が混入する場合、白濁度の高い被験者の方が E^*_{ab} が大きくなり、弁別能力が低いことがわかった。白濁度のすすんでいる被験者は水晶体の黄変化が大きく、短波長光の感度が低くなることが原因とも考えられる。

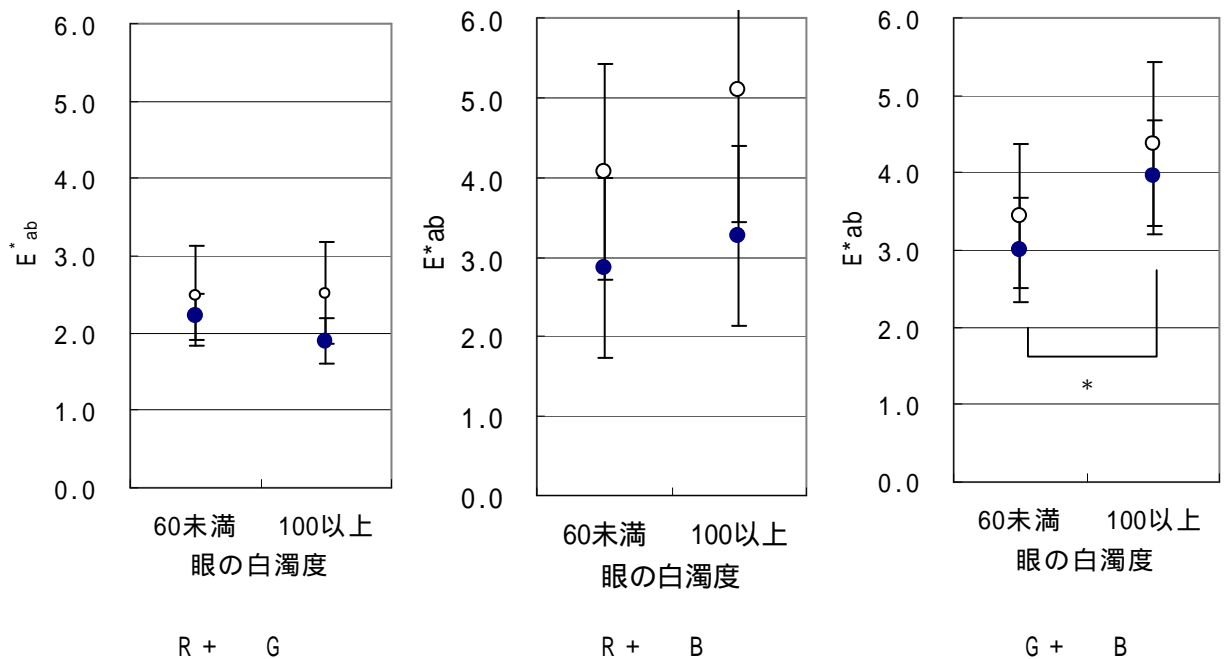


図 2.65 色弁別閾の白濁度による違い

* : $p < 0.05$

(エラーバーは 95% 信頼区間)

○ : LED
● : 蛍光灯

弁別閾とした色票が実験時の照明下でどの程度色差があったかについて、検討するため、LEDと蛍光灯照明下での色票の色をコニカミノルタ分光放射輝度計 CS1000 で測定した。測定した色票の xy 色度を図 2.66 に示す。矢印の方向は基準色票に近づく方向である。

同じ色の色票でも LED と蛍光灯の下では計測結果が異なっていたことが確認できた。

特徴的に x 値のずれがあり、LED に対して蛍光灯の方が x 値が高く、やや赤っぽく見えていることが考えられる。

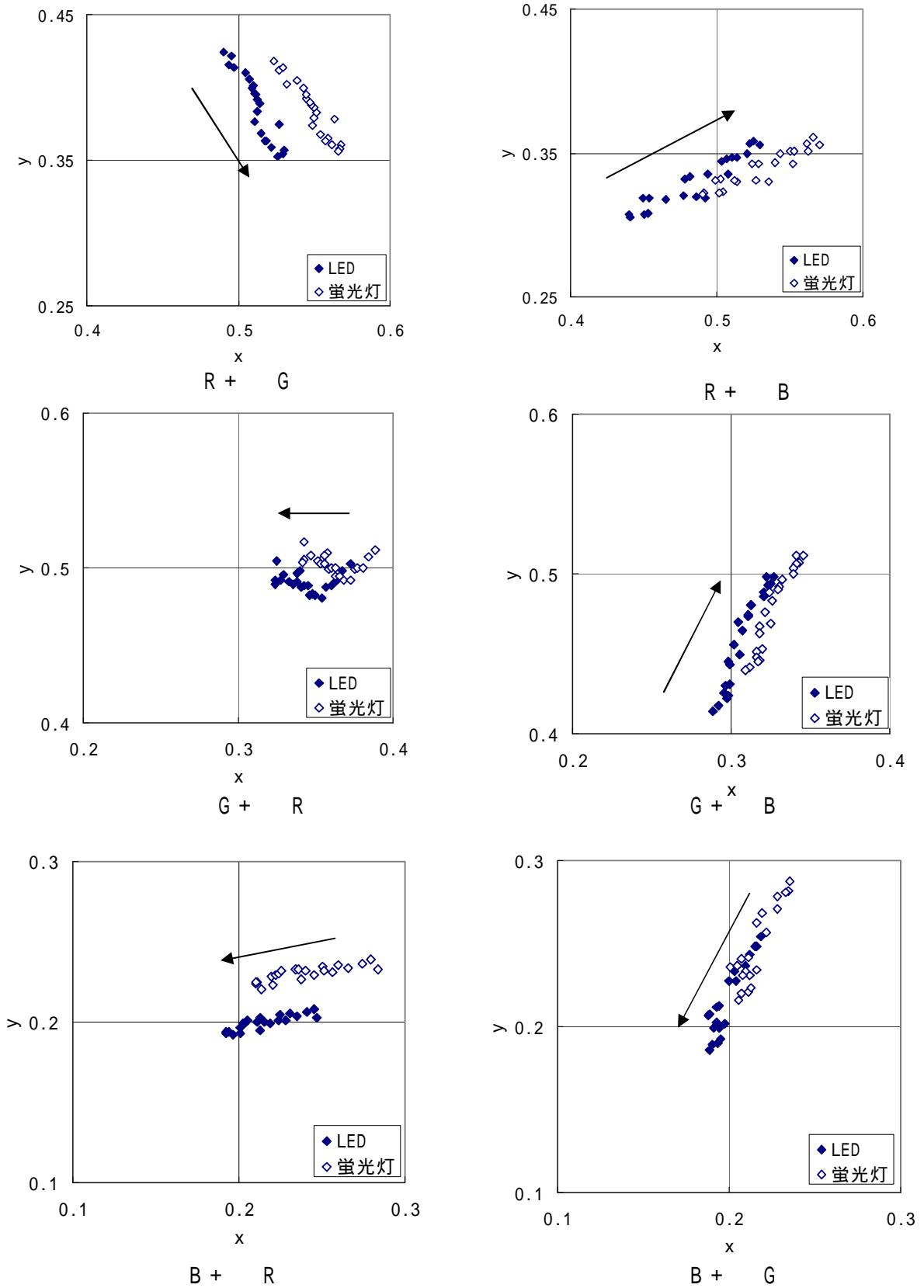


図 2.66 LED照明下と蛍光灯下での色票の xy 色度
(は基準色票に近づく方向)

各色票の照明の下での実際の色差を求めることとした。色差を求める色差式として E^*_{ab} に加えて CIEDE2000 色差式で求める色差 E_{00} ³³⁾、および CIECAM02 色の見えモデルに基づく E_{CAM02} ³⁴⁾ を求めた。基準色票の計測値が欠損しているため、基準色票と同じ色設定で印刷している色票番号 22 に対する色差を計算した。 E^*_{ab} を図 2.67、 E_{00} を図 2.68 に E_{CAM02} を図 2.69 に示す。

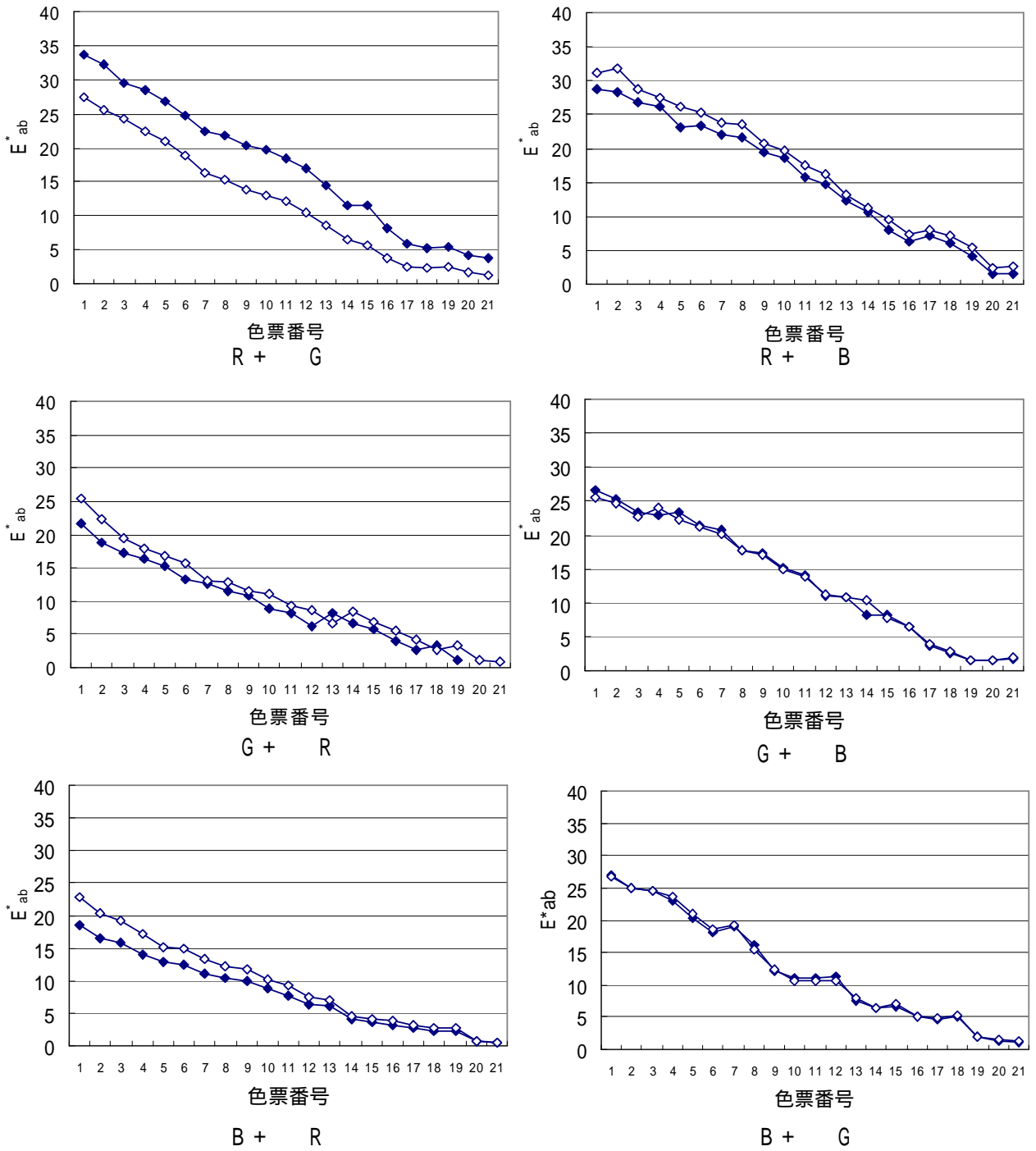


図 2.67 LED照明下と蛍光灯下での色票の色差 E^*_{ab}

: LED
 : 蛍光灯

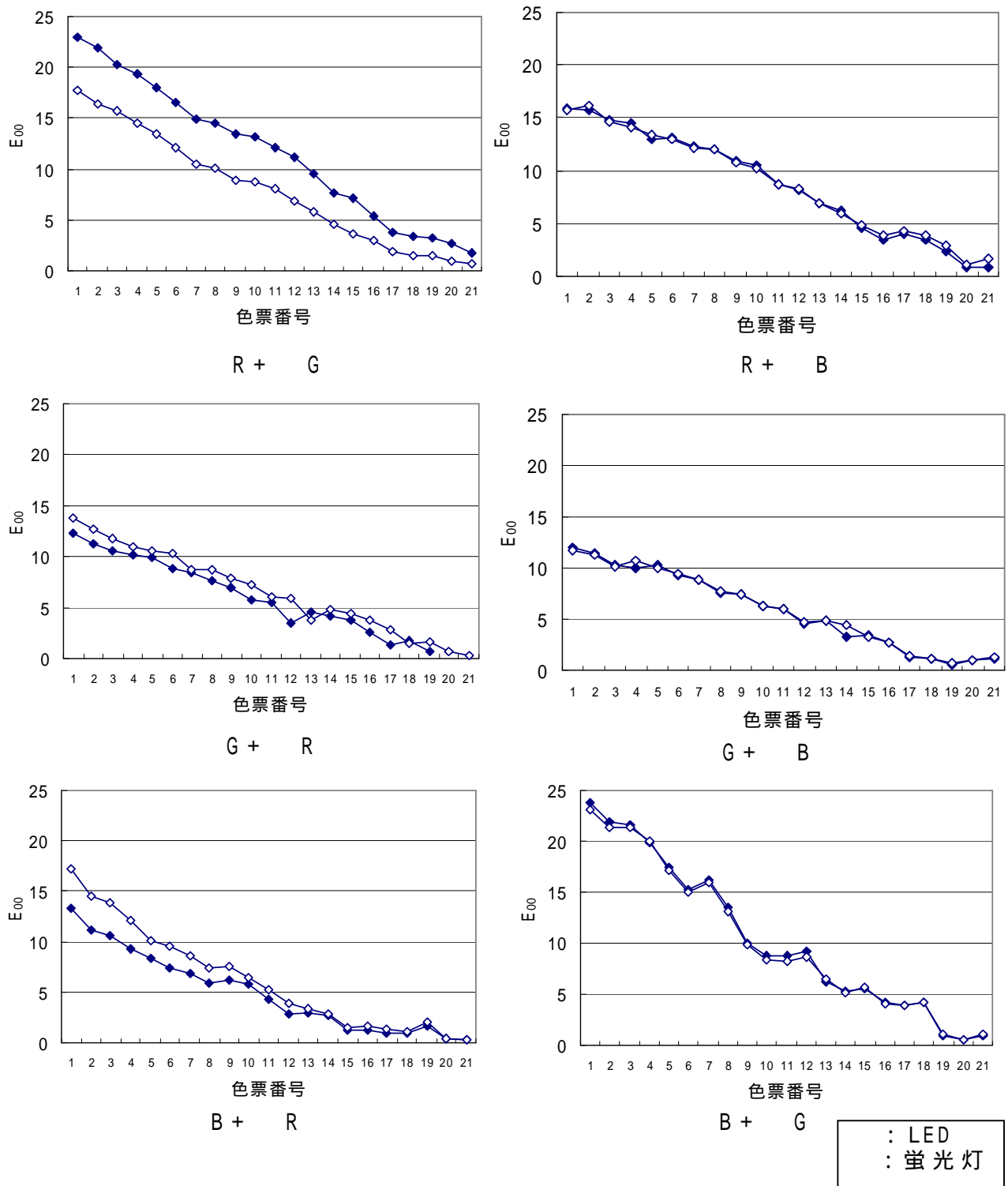
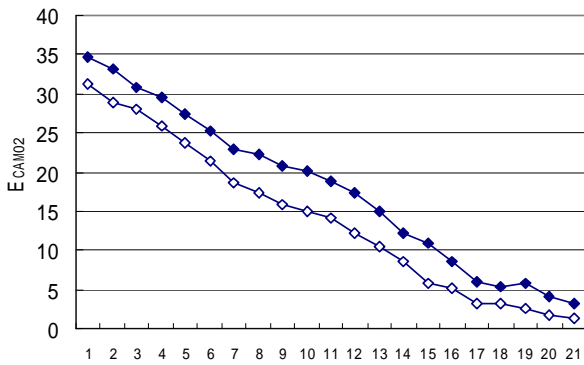
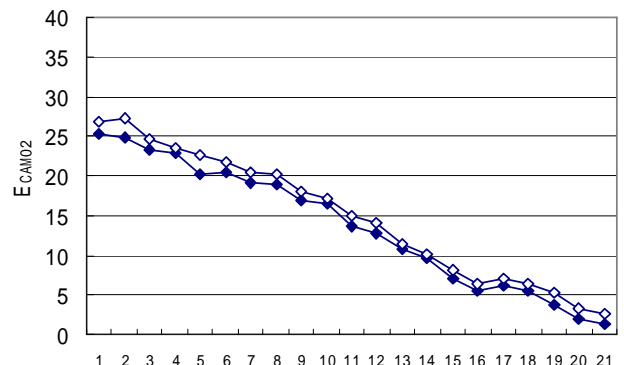


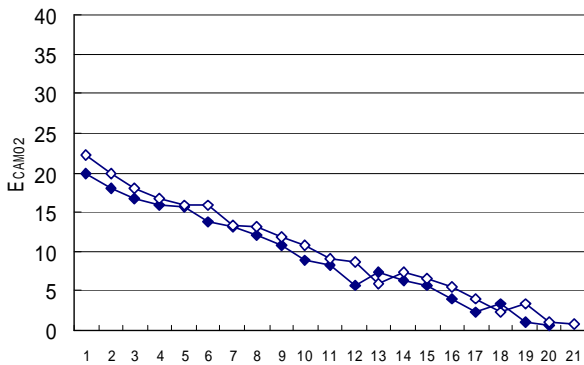
図 2.68 LED照明下と蛍光灯下での色票の色差 E_{00}



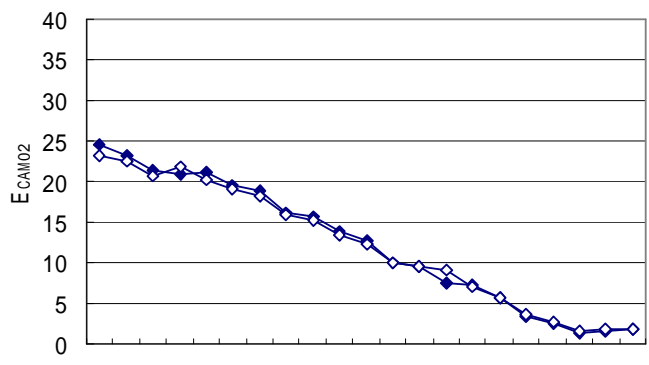
色票番号
R + G



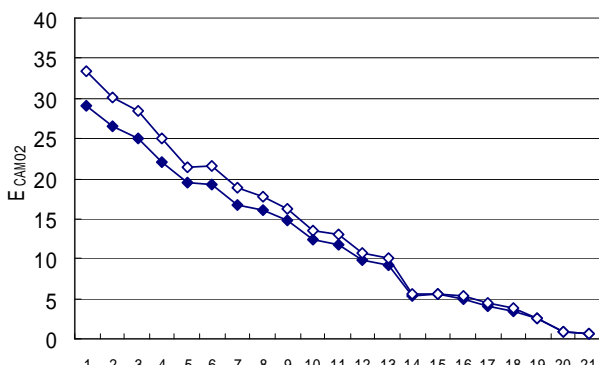
色票番号
R + B



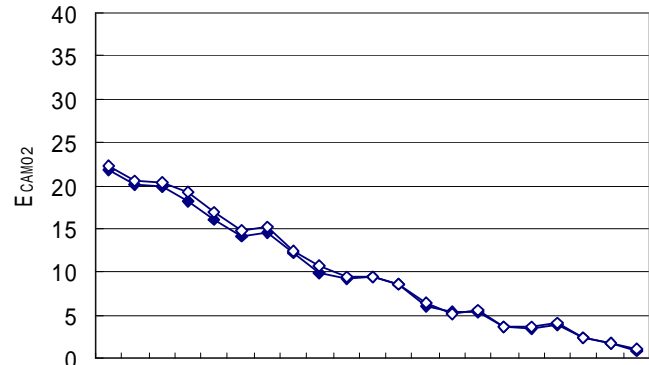
色票番号
G + R



色票番号
G + B



色票番号
B + R



色票番号
B + G

○ : LED
◇ : 蛍光灯

図 2.69 LED照明下と蛍光灯下での色票の色差 E_CAM02

測定および計算結果は，同じ色票であっても照明光源の違いで色だけでなく，色票の色差が異なっていることを示している．特に赤色に緑色成分が混入する色票において，照明による色の差が大きかった．蛍光灯の方が色票の x 値が大きかったため，赤っぽく見えて見わけにくかった可能性が考えられる．

次に各色差式と人間の色差の感覚に対応について検討を行った．

各被験者の弁別能力は眼の疲労が激しくない限り，常にほとんど同じであると考えられる．図 2.67～図 2.69 の値からそれぞれの色差式による弁別閾の色票の色差の平均値を求めた．

E_{ab}^* を図 2.70 に， E_{00} を図 2.71 に， E_{CAM02} を図 2.72 に示す．

E_{ab}^* や E_{00} では弁別閾の色差は LED と蛍光灯で異なっているが E_{CAM02} ではほぼ同じ値となった．人間の色差感覚に対して E_{CAM02} が最も対応が良い可能性があることが示された．

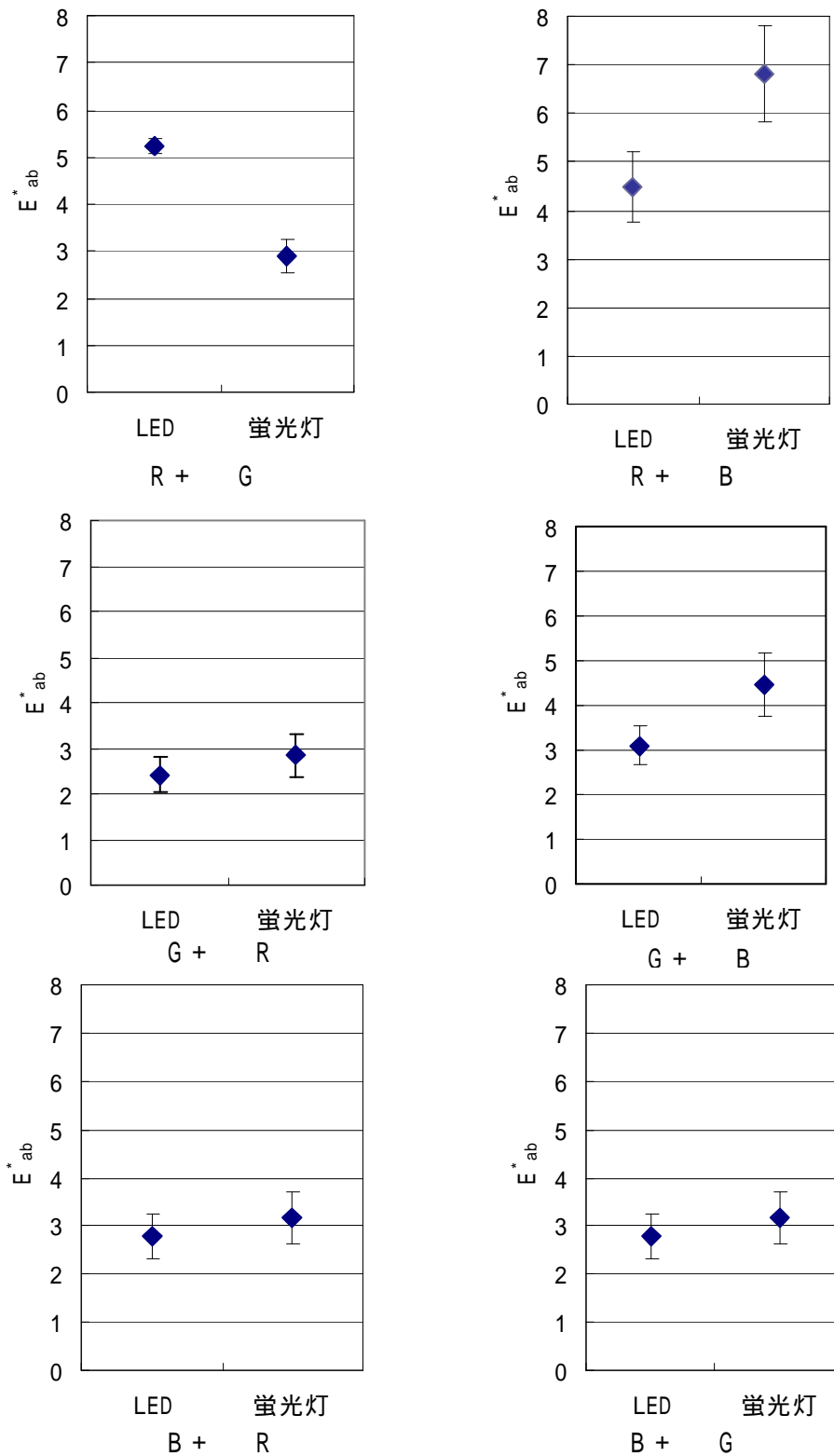


図 2.70 弁別閾色票の照明下での実測値 (E^*_{ab})
 エラーバーは 95% 信頼区間

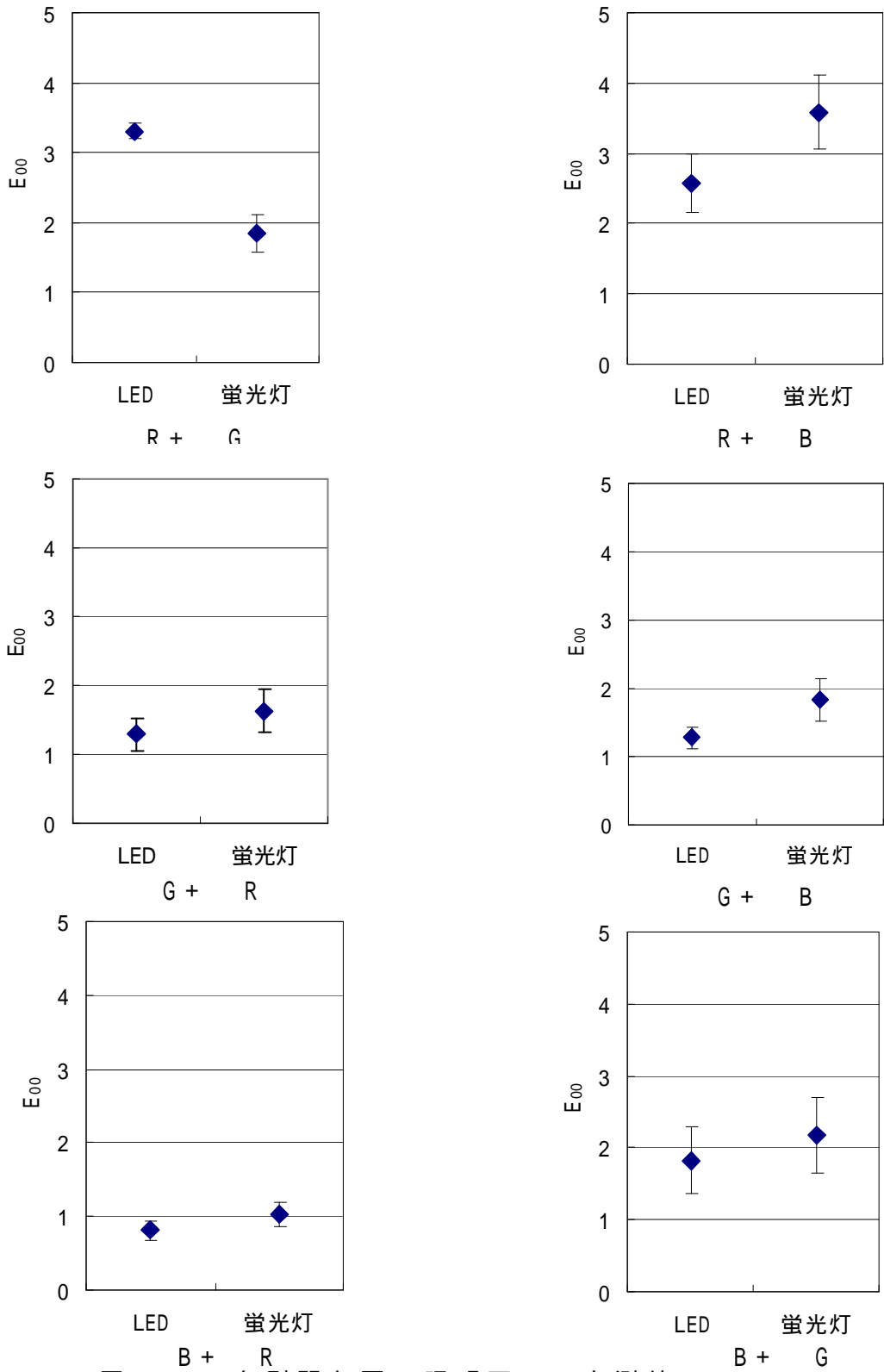


図 2.71 弁別閾色票の照明下での実測値 (E_{00})

エラーバーは 95% 信頼区間

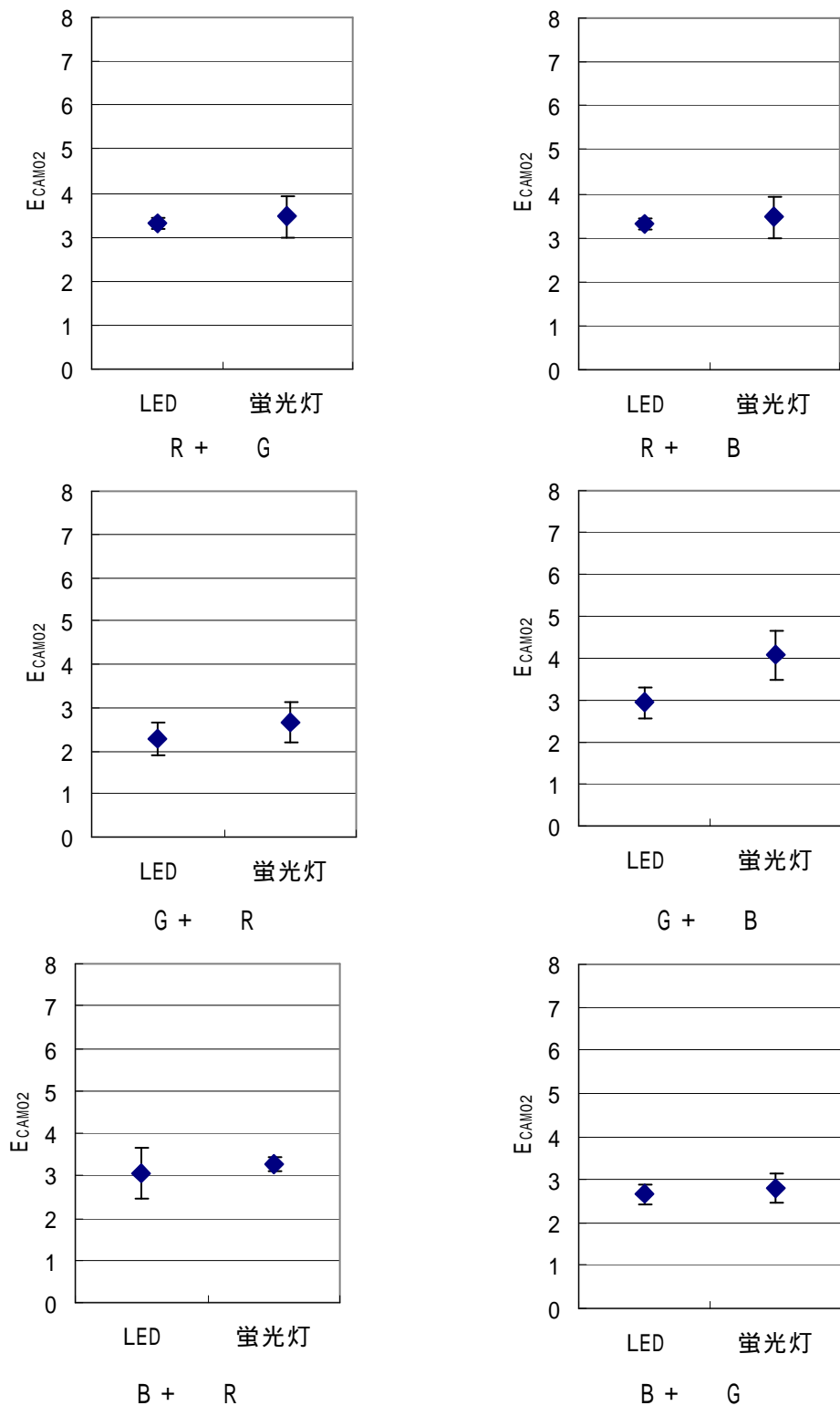


図 2.72 弁別閾色票の照明下での実測値 (E_{CAM02})
エラーバーは 95% 信頼区間

2.5.5.1 第二実験

22名で実験を行った。年代別人数は表 2.16 に示したとおりである。

表 2.16 第二実験の被験者の年代と人数

	男性	女性
20 歳代	2	0
30 歳代	7	3
40 歳代	6	3
50 歳代	1	0

第一実験と同様に求めた、弁別閾の色票の色差の平均値を図 2.73 に示す。第一実験の昼白色に対し、赤色と緑色に対しては弁別閾の色差が小さく、 E^*_{ab} で 1~2 であった。一方青色に対しては 2~3 で同レベルであった。また、第一実験のように光源による差は見られなかった。

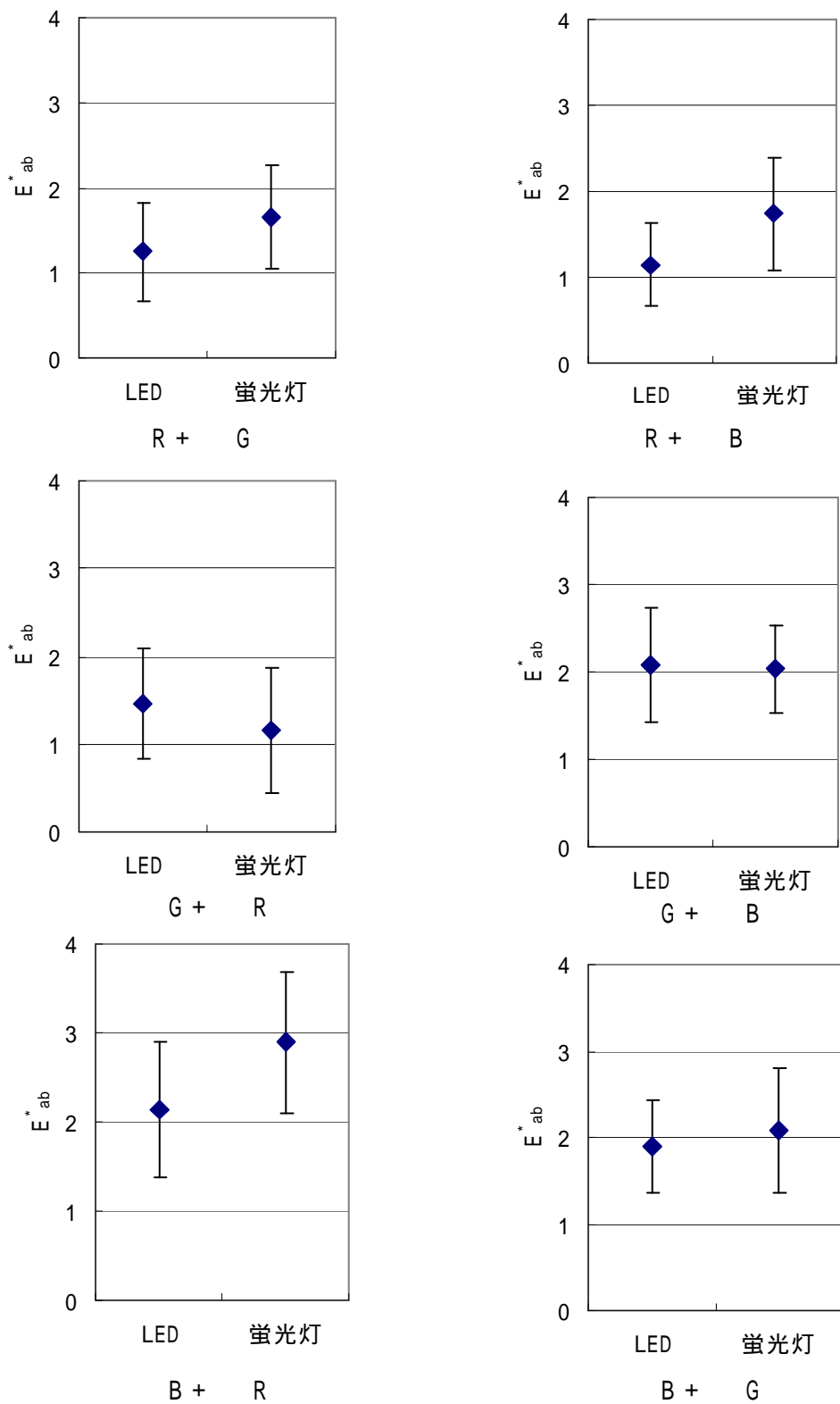


図 2.71 同じ色票での L E D 照明下と蛍光灯下での色弁別閾
エラーバーは 95% 信頼区間

第一実験と同様に実際の照明下での色票の色を確認するため、CS1000で測定した、照明下での xy 色度を図 2.72 に示す。矢印の方向が基準色票に近づく方向である。

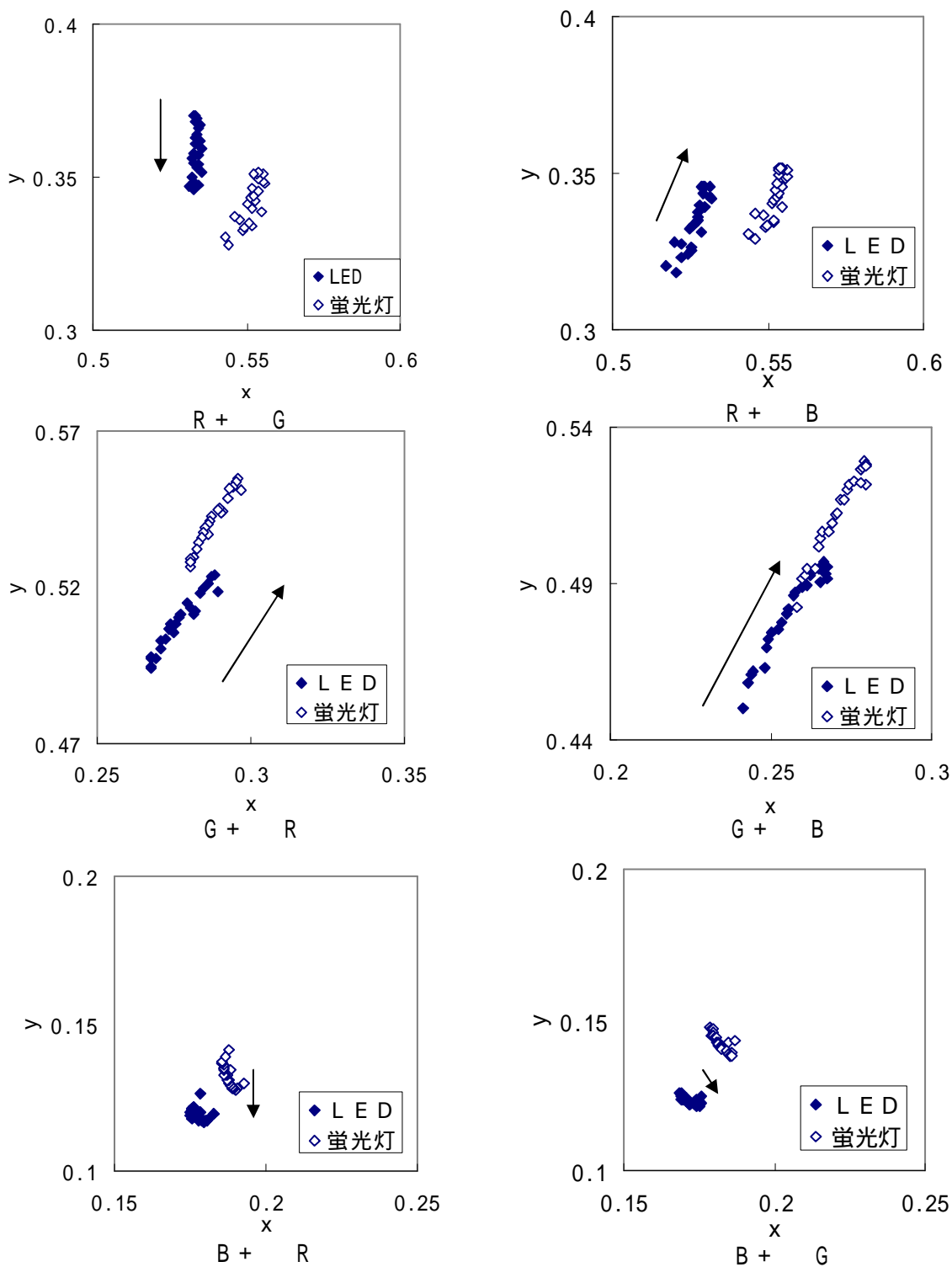


図 2.72 LED照明下と蛍光灯下での色票の xy 色度 (\blacklozenge は基準色票に近づく方向)

第二実験における光源による色の違いは y 方向に見られた。MacAdam 楕円に示されている通り、特に y 値が 0.3 以上の領域では y 方向の色差は見わけにくいことがわかっており³⁵⁾、照明の違いは表れなかったと考えられる。

また、測定した $X Y Z$ から色票の照明下での色差を求めた。

E^*_{ab} を図 2.73、 E_{00} を図 2.74 に E_{CAM02} を図 2.75 に示す。第二実験に使用した照明下では色差の計算式によって色差の違いが大きい色系が異なることが示された。

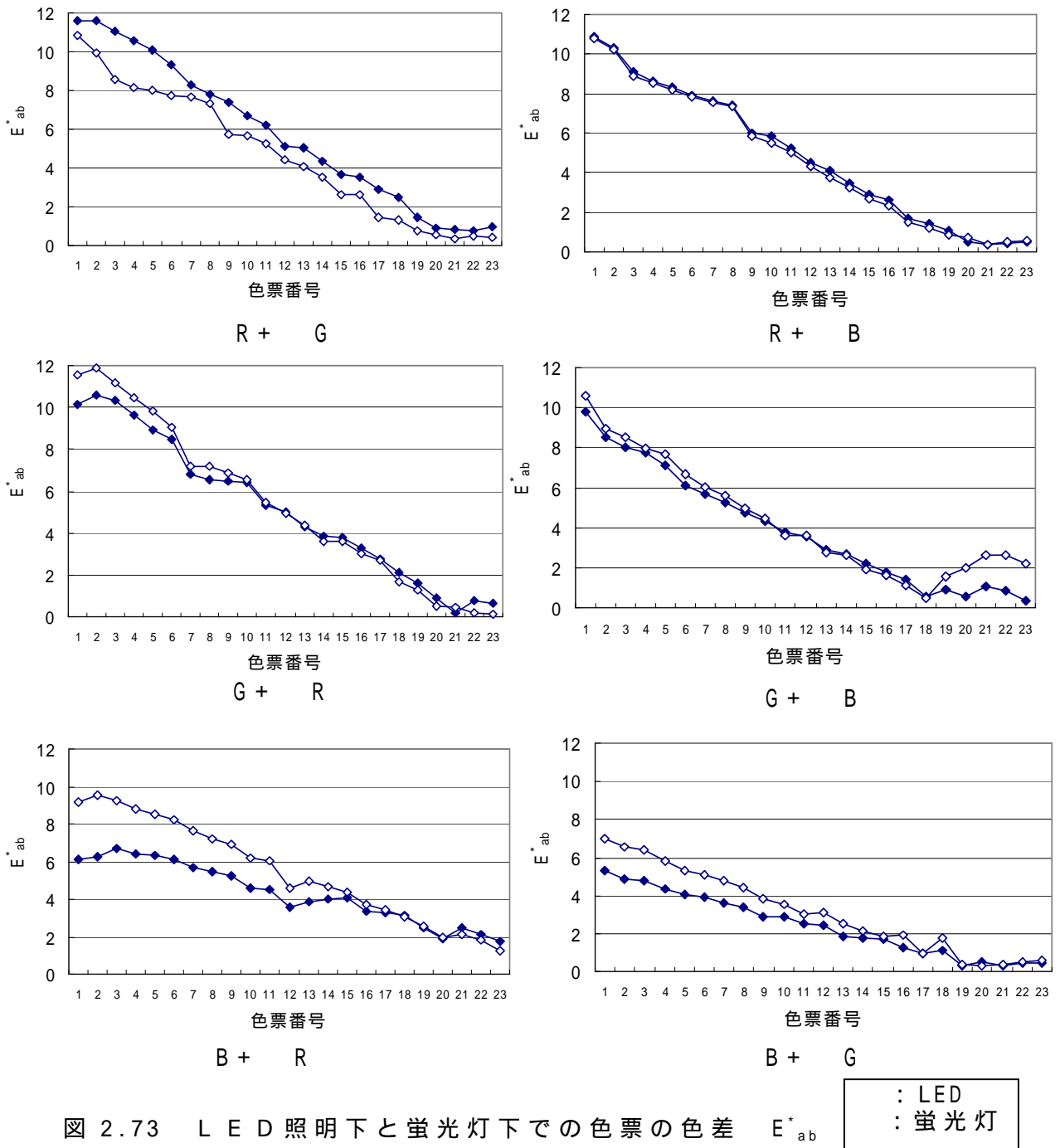
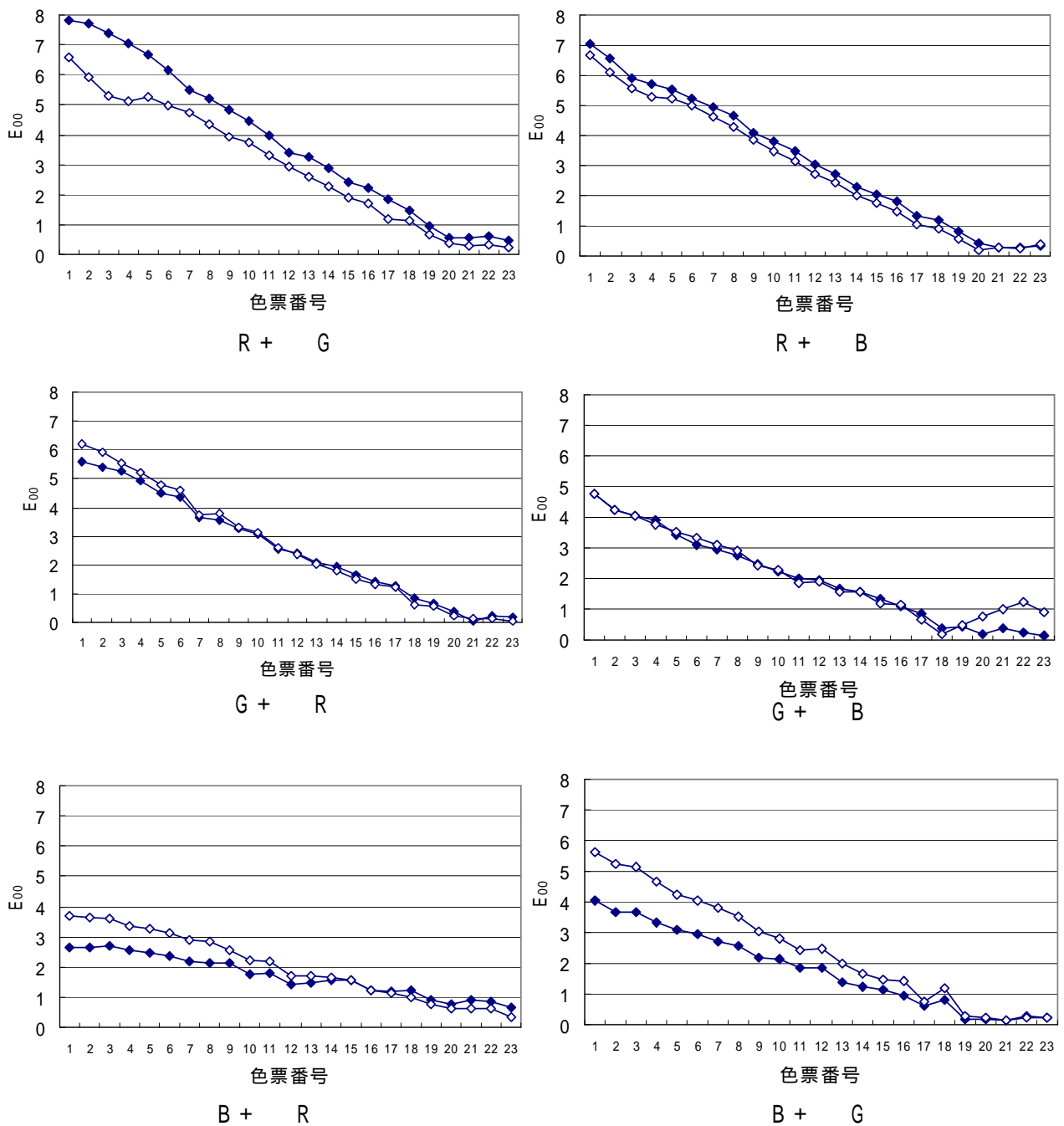


図 2.73 LED照明下と蛍光灯下での色票の色差 E^*_{ab}



◇ : LED
○ : 蛍光灯

図 2.74 LED照明下と蛍光灯下での色票の色差 E_{00}

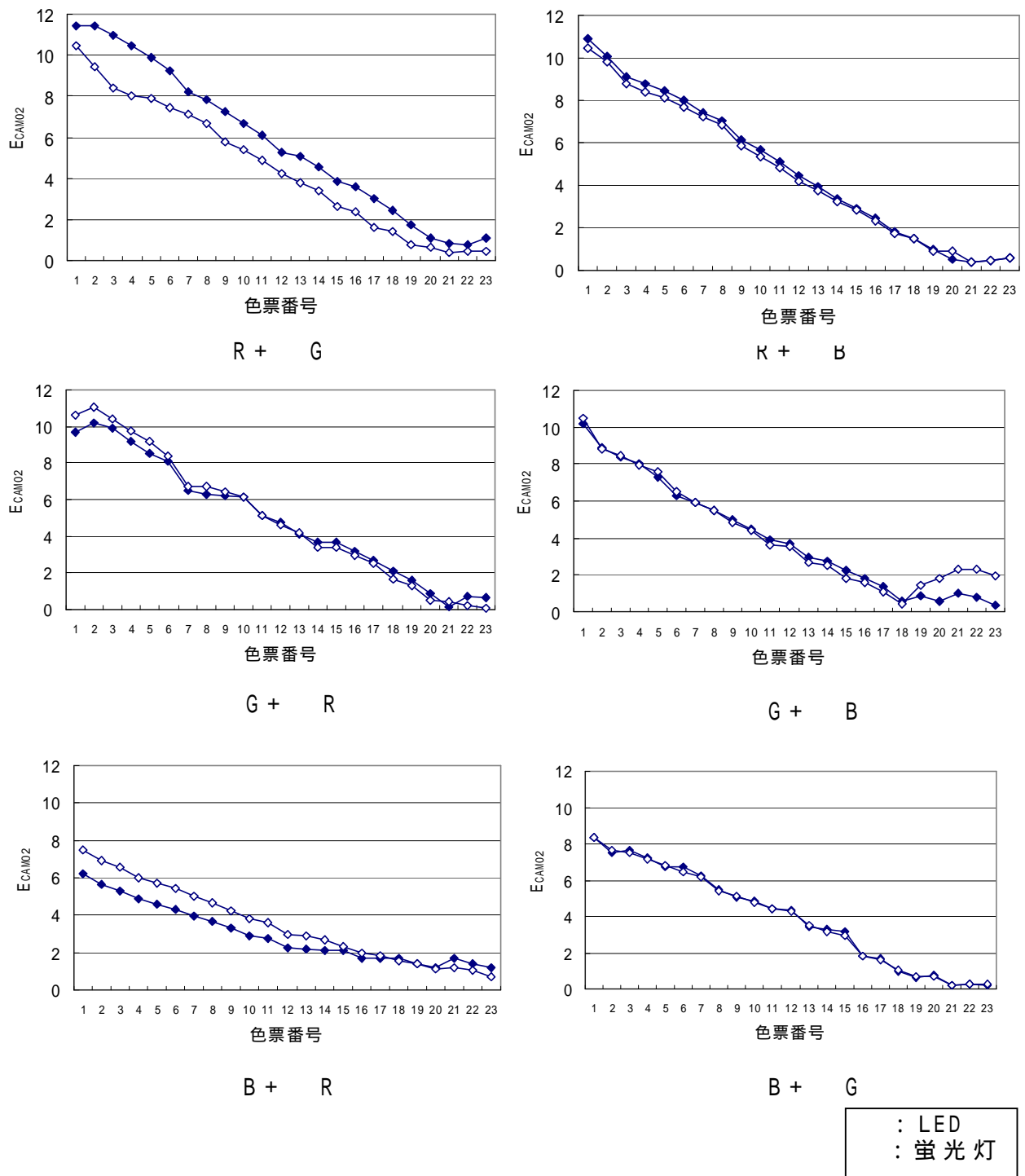


図 2.75 LED照明下と蛍光灯下での色票の色差 E_{CAM02}

第一実験と同様に図 2.72 ~ 図 2.74 の値から弁別閾の色票の色差の平均値を求めた。 E_{ab}^* を図 2.76 に E_{00} を図 2.77 に、 E_{CAM02} を図 2.78 に示す。

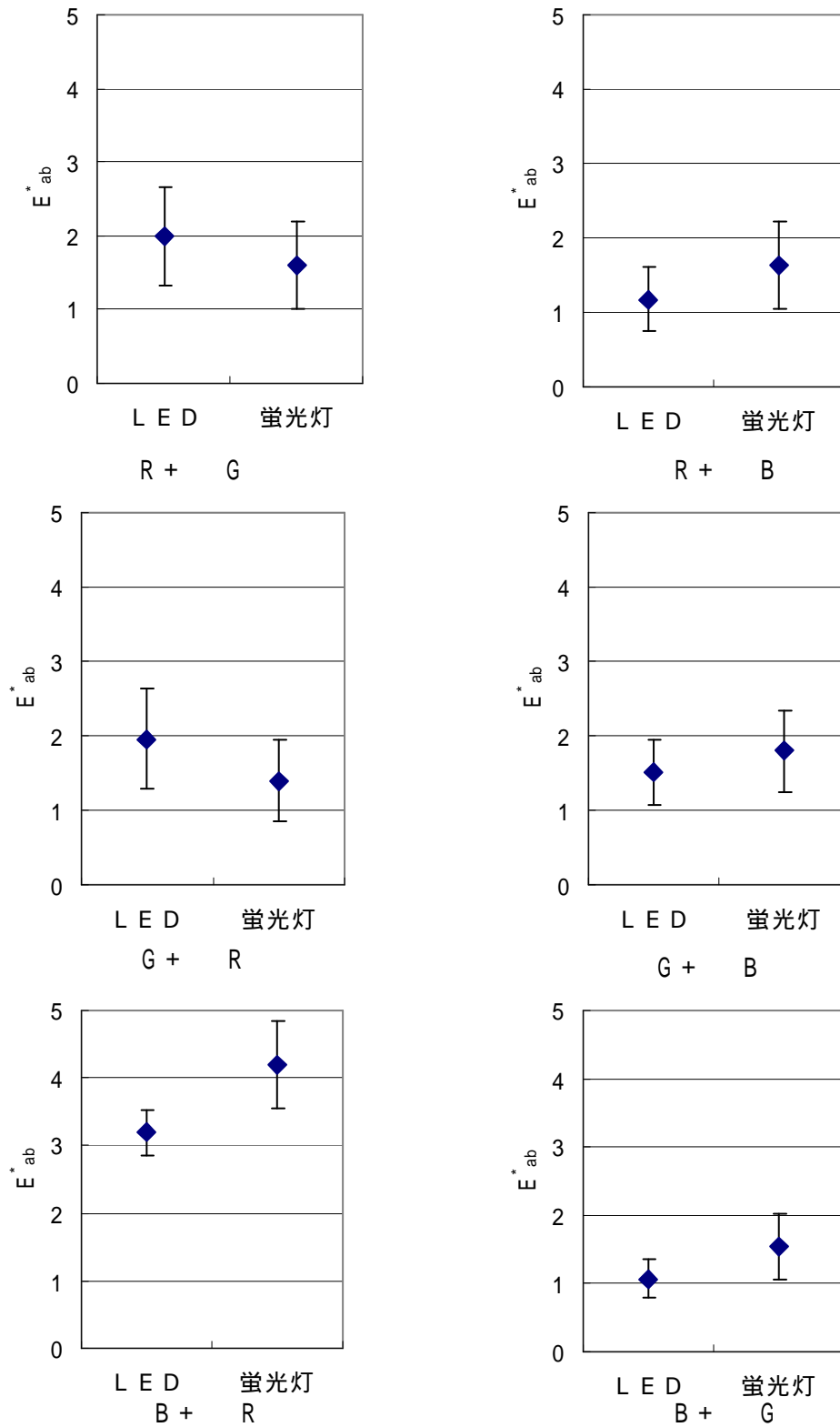


図 2.76 弁別閾色票の照明下での実測値 (E^*_{ab})
 エラーバーは 95% 信頼区間

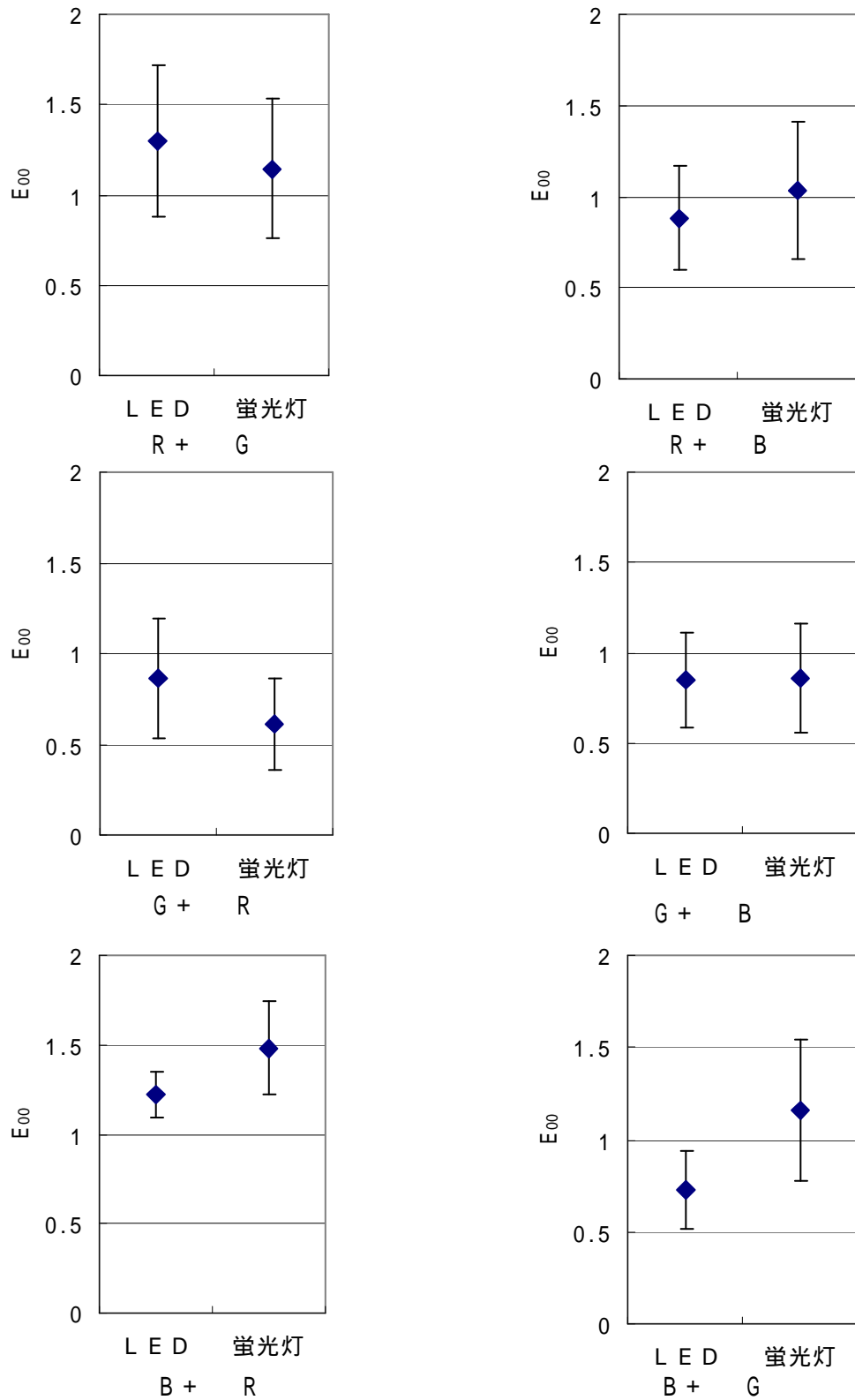


図 2.77 弁別閾色票の照明下での実測値 (E_{00})
エラーバーは 95% 信頼区間

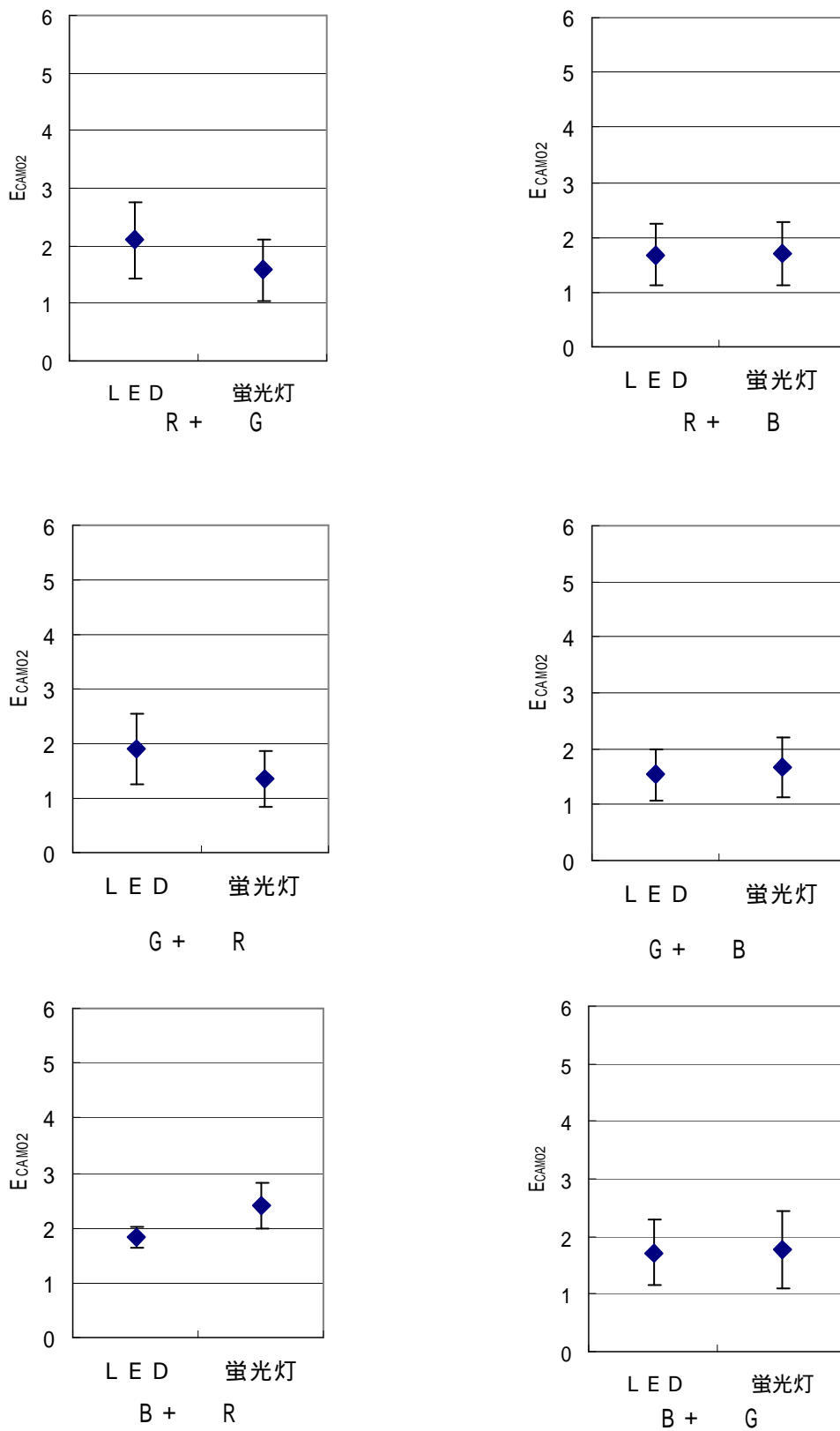


図 2.78 弁別閾色票の照明下での実測値 (E_{CAM02})

エラーバーは 95% 信頼区間

2.5.6 考察

照明条件の違いによる色差の見え方は第一実験では x 方向，第二実験では y 方向であった．第一実験，第二実験どちらも L E D の方が相関色温度が高いため，黒体軌跡上の色温度のずれは昼白色付近では x 方向，昼光色付近では y 方向であることが原因である．

第一実験よりも第二実験の方が赤緑において色差弁別性が高かったことは相関色温度が高い場合，光の中の短波長成分が相対的に高く，やや長波長側にある赤や緑に対して混入している色短波調成分のエネルギーが高く，見やすいのではないかと考えられる．

このことから，第一実験において，赤色や緑色が L E D の方が色弁別性が高かった原因は L E D の方が蛍光灯よりも相関色温度がやや高かったためと考えられる．

高齢者において，その傾向が高かったのは高齢者には眼の黄変化による短波調光の感度低下があるためと考えられ，高色温度の照明下では弁別能力を保てるが，やや色温度が低い照明下においては，混入している色がより感じにくいのではないかと考えられる．

2.5.7 まとめ

同じ色票を使った色差弁別性は照明条件によって異なることが確認された．照明の分光分布の影響により，色票の色の見えが異なるためである．色温度が高い照明では赤色や緑色に対する色弁別は高くなる傾向が見られた．高齢者においては，その傾向が強くなることが確認できた．

また，人間の色差の感じ方に対しては今回確認した三つの色差式の中では CIECAM02 による計算式が最も合致していると考えられる．

色差弁別を必要とするような工場の検査工程などでは，検査対象の色に合わせて照明の色温度設定や光源選択を考慮すれば，より精度が上昇すると考えられる．

2.6 本章のまとめ

本章ではLED照明が視覚的タスクである「視認性」に与える影響を、可読性および色の目立ち、色弁別を対象に取り上げた。

可読性において、特に高齢者は、視機能の低下による見やすさへの影響が大きく懸念されるため、照明の要因の影響が加齢によってどんな変化をするのかについて年齢の異なる被験者を対象に研究を行った。文字のコントラストや文字と背景の明度差が可読性に影響を与えることを確認したが、高齢者においては若齢者とは異なる特徴を示すことが明確になった。

高齢者にとっては白黒文字に対しては相関色温度が高い照明下の方が文字が読みやすいことを見いだした。また、色弁別性においては高色温度の方が赤や緑に対する弁別性が高かった。一方、色の目立ちでは加齢によって相関色温度の高い照明条件ではやや低下が見られた。

これらは全て加齢による水晶体の黄変化やそれによる感度の低下による見え方の変化が原因と考えられ、高齢者に優しい空間作りのためには照明の色温度に気を配った設計が効果的であることを明確にした。

3 対象物の見えに対する影響

3.1 本章のはじめに

照明に求められる重要な品質の一つに照明下における対象物の見えがあることは1章にて述べたが、対象物は美術品や商品など場所によって様々であり、それぞれの対象物ごとに最適な照明が求められる。

本章では一般照明において比較的重要性が高いと考えられる、人の肌や食品の見えを取り上げて研究することとした。

LEDはチップと蛍光体の選定によって分光分布の調整を行うことができるため、分光分布の調整によってより対象物の見えを浴することができる可能性があり、検討を行った。

まず、3.2項において、分光調整によって肌や食品の見え方に違いを与えることができるということを確認した。3.3項においては具体的にどのような分光成分が見えに対して影響があるか、分光分布の違いを抽出する方法の検討を行い、主成分分析によって特徴を見いだすことができることを確認した。

3.2 見えを良くするための分光分布についての研究

3.2.1 目的

照明下における物の見え方を良くするため、分光分布の調整により、効果を高めようという試みがなされている³⁶⁾³⁷⁾。しかしながら「見え方の好ましさ」に対する分光調整の効果がどの程度あるのかについて具体的な報告例はない。そのため被験者を使った感性評価実験によって効果を確認する実験を行った。

住宅用照明において、光の質を重要視すると考えられるシーリング照明をターゲットにした。主にLDKでの使用を考え、だんらんや食事の際の「顔(人肌)の見え」「食品の見え」について分光分布の影響について検討を行うこととした。

3.2.3 実験照明

570nm~580nmの分光強度を低下させることで人肌の黄くすみ感をなくし、好ましさを向上させる効果があると言われている³⁷⁾。簡易的にこのような分光分布を再現するため、白色LEDランプに市販のフィルタを貼付し、実

験照明とした。準備した 3 水準について表 3.1 に示す。基準となる白色 LED 照明：C に対して、照明 A,B はフィルタを装着することで 570nm を中心として強度を減少させている。また、照明の演色性と相関色温度、Duv の測定値を表 3.2 に示す。

表 3.1 実験照明の仕様

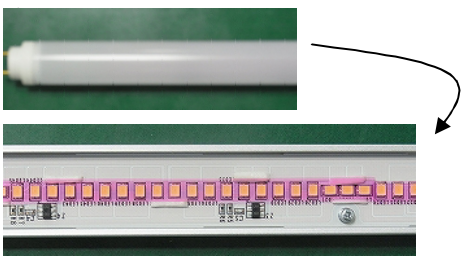


	構成	仕様	写真
A	C+ フィルタ	富士フィルム CCM20	ケース内にフィルム貼付 (フィルム市販サイズが小さいた 
B	C+ フィルタ	オールウェイズ蛍光灯用色補正フィルタ マイナスグリーン 248	ケース外にフィルム貼付 
C	白色 LED	直管 LED 試作品	

表 3.2 実験照明の測定値

	Ra	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	CCT	Duv
A	91	92	92	94	91	93	86	89	90	78	89	89	83	90	96	92	4610K	0.024
B	90	92	95	95	90	93	90	87	78	47	89	91	81	93	98	91	4960K	0.013
C	80	77	85	91	79	78	79	87	66	4	64	76	57	78	95	72	4970K	0.005

照明の分光分布グラフを図 3.1 に示す。

実験照明の色度を図 3.2 に示す。

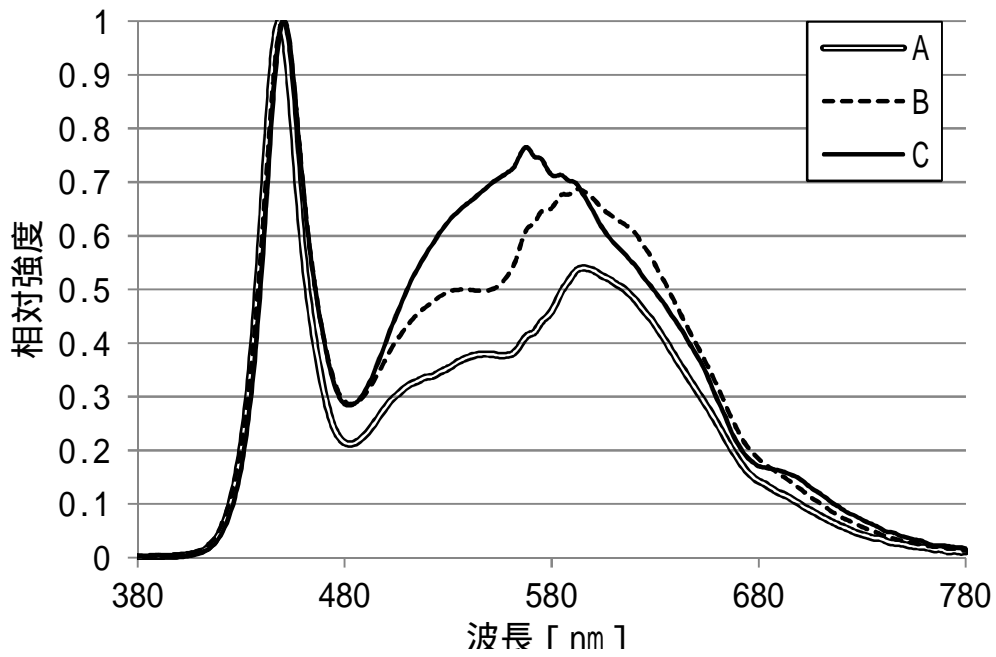


図 3.1 実験照明の分光分布

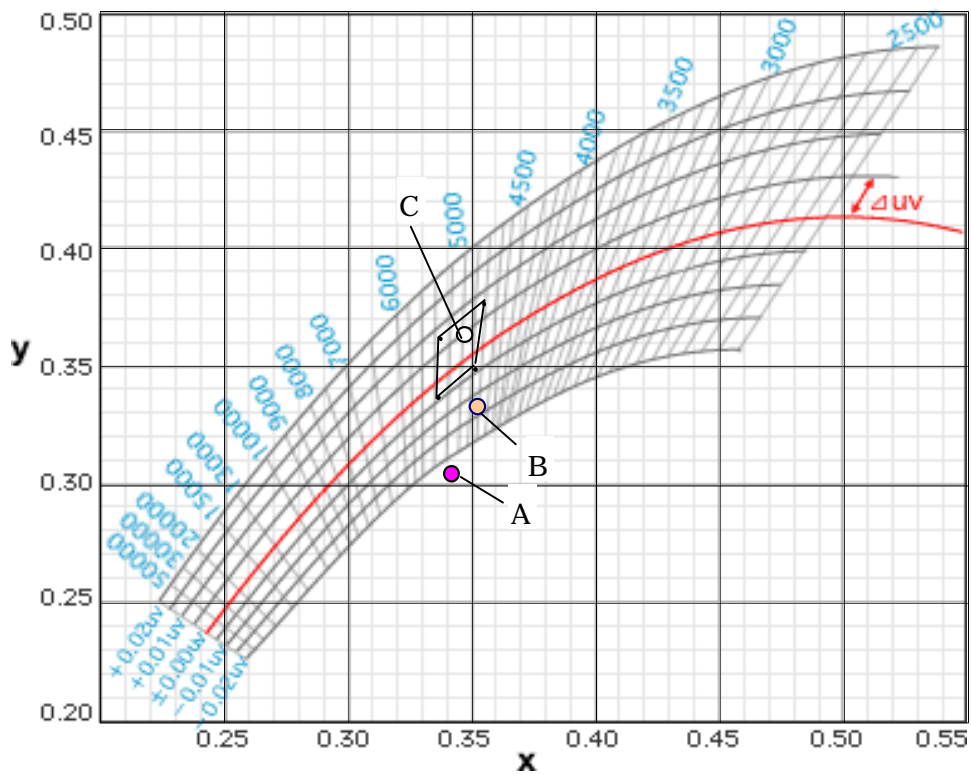


図 3.2 実験照明の色度

3.2.4 実験環境

机上面をグレー，壁を黒にした暗箱の中に観察対象を置き，上方から照明を照射してそれぞれを被験者が観察できるようにした．レイアウトを図 3.3 に示す．

観察対象は以下の3つである．

マネキンの肌

自分の肌（鏡で観察）

食品（食品サンプル）

食事や居間でくつろぐ際の空間を想定し，JIS Z9110 照明基準総則を参考に実験机上面を 400[lx]に設定した．

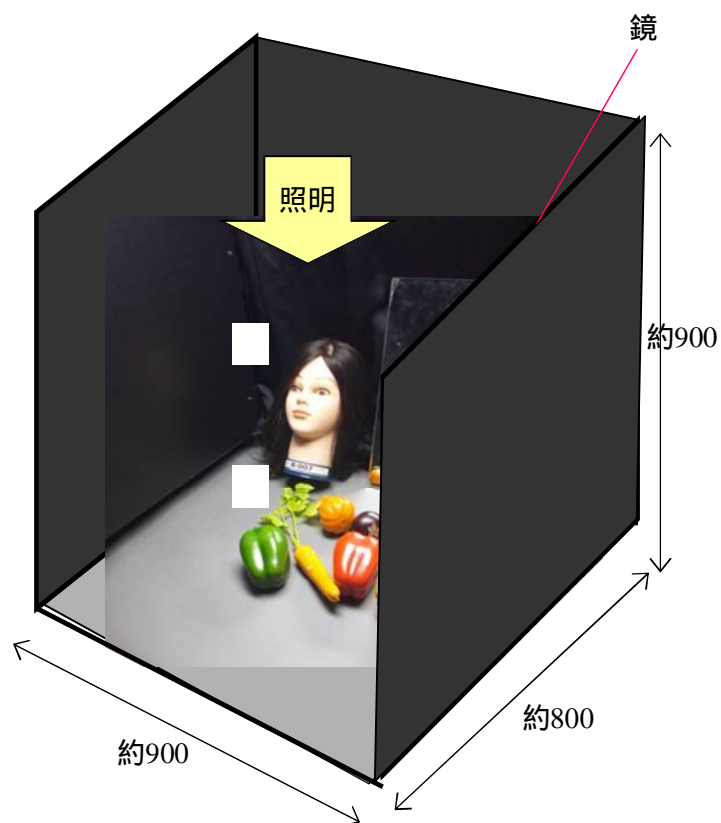


図 3.3 実験レイアウト

3.2.5 被験者

20歳代から50歳代の男性10名，および20歳代から40歳代の女性10名の合計20名にて実験を行った。

3.2.6 実験方法

以下の二つの評価を行った。

照明下での対象物の見えの好ましさについて100点満点で点数づけ

S D (Semantic Differential) 法による7段階評価

実験に使用した評価項目を実験に使用した書式で図3.4および図3.5に示す。

	非常に	かなり	やや	どちらでも もない	やや	かなり	非常に
明るさ	暗い						明るい
肌色	色白でない						色白
健康さ	不健康そう						健康そう
肌質	くすんでいる						透明感がある
自然さ	不自然						自然
肌の見え	美しくない						美しい
好ましさ	好ましくない						好ましい
上品さ	上品でない						上品
総合照明評価(100点満点)							点

図 3.4 肌に対する評価項目

	非常に	かなり	やや	どちらでも もない	やや	かなり	非常に
明るさ	暗い	----- ----- ----- ----- -----					明るい
美味しさ	不味そう	----- ----- ----- ----- -----					美味しそう
鮮やかさ	鮮やかでない	----- ----- ----- ----- -----					鮮やか
自然さ	不自然	----- ----- ----- ----- -----					自然
鮮度	鮮度を感じない	----- ----- ----- ----- -----					鮮度を感じる
好ましさ	好ましくない	----- ----- ----- ----- -----					好ましい
総合照明評価(100点満点)							点

図 3.5 食品に対する評価項目

3.2.7 実験結果

3.2.7.1 総合点

3つの対象に対する各照明の総合点の20人平均値を図3.6に示す。エラーバーは95%信頼区間である。

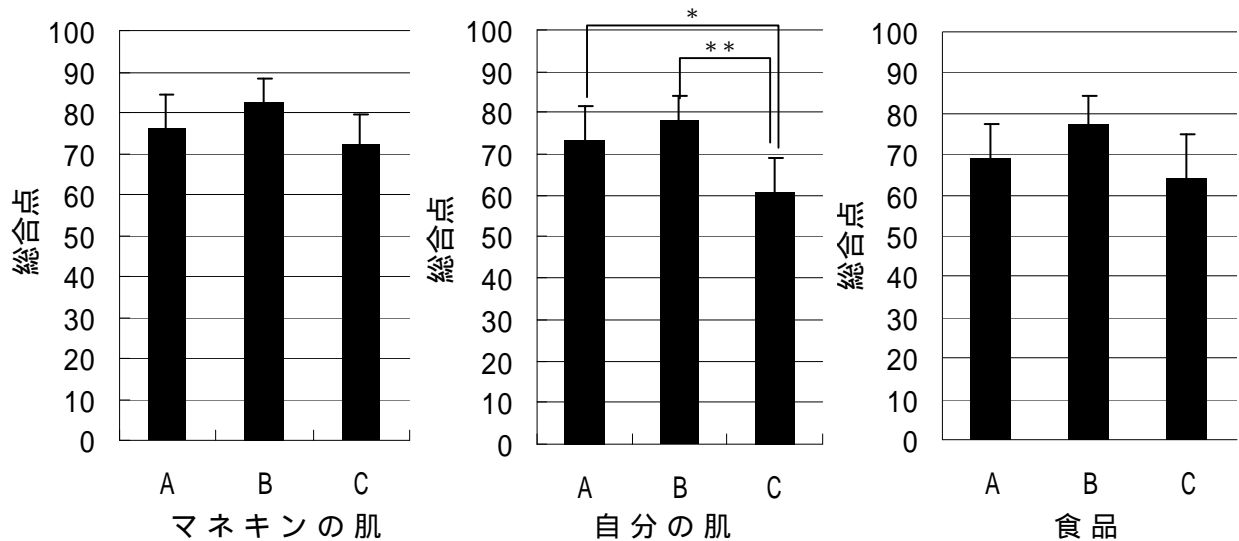


図 3.6 総合点結果

* <math>p < 0.05</math>
 ** <math>p < 0.01</math>

照明 C に対しフィルタを使用した照明 A 及び照明 B の評価が高く、自分の肌に対しては統計的有意差が見られた (Tukey の多重比較にて検定) ことから、570nm 付近の分光強度の低下には肌の見えに対する効果があることが確認された。照明 A と B には統計的有意差が見られなかったが、B の方がやや評価が高い傾向が見受けられた。照明 A はスペクトル調整が大きく、分光調整は大きすぎると評価が下がり、最適範囲があると考えられる。B の方が効果的な調整量に近かったと考えられる。

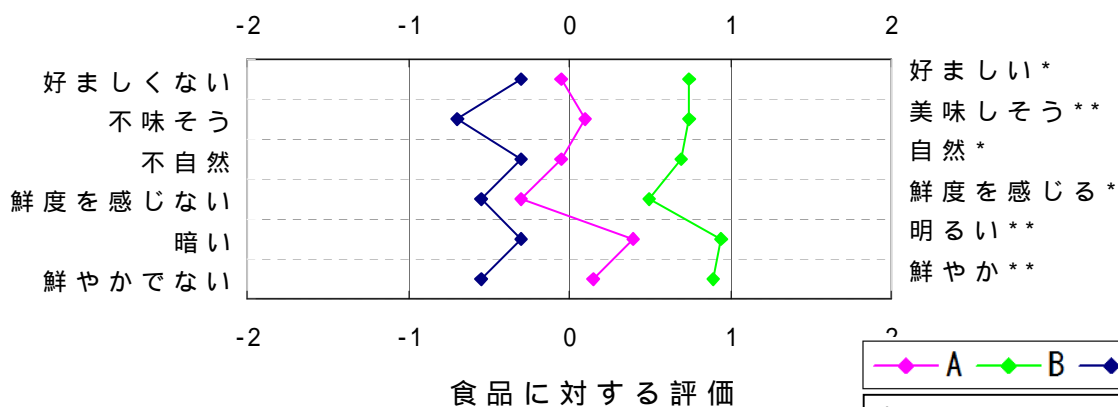
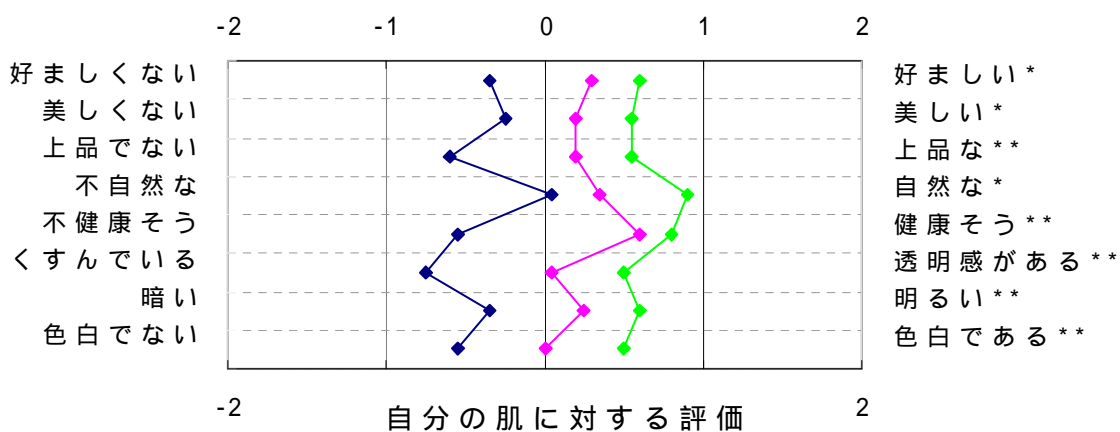
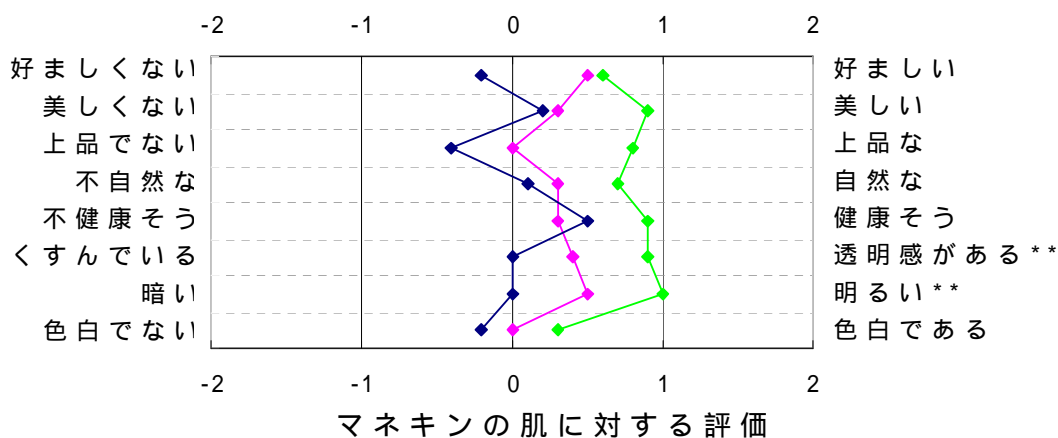
3.2.7.2 SD 法による各評価項目での点数

評価項目毎の評価結果の 20 人平均値を図 3.7 に示す。照明 C については自分の肌と食品に対する評価ではマイナスの評価がされ、一般的な白色 LED の分光分布に対しては見え方にやや不満があることを示している。それに対し、フィルタを装着した A, B については多くの項目でプラスの評価がされており、分光分布の調整は見え方に対して効果があることを示している。

照明 A, B, C に対する有意差検定を行った結果、照明 C に対して照明 B の評価が有意に高かった。

また、マネキンより自分の肌に対する評価の方が照明の違いを感じやすいことがわかった (図中分散分析結果 * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)。マネキンの肌は被験者よりも赤みが強く、スペクトル調整による効果が低かったと考えられる。対象の人の肌の色 (人種) によって分光調整の効果度合いが異なると考えられる。

自分の肌に対する評価において「健康さ」「透明感」は照明 A, B 両方が C に対して有意に評価が高く (tukey の多重比較検定)、分光調整による見えの効果は人肌に対してより健康的に見せるとともに透明感を感じさせることがわかった。



◆ A ◆ B ◆ C

* : $p < 0.05$
* : $p < 0.01$

図 3.7 照明による評価の違い

3.2.7.3 自由回答による照明の比較

被験者 20 名に対し、各照明での評価の後、照明下での見え方について意見を求めた。その結果を図 3.8 に示す。照明 B が最も肯定的な意見が多く、照明 A に対しては不自然さ、照明 C に対してはくすみや暗さ感を訴える意見が

見られた。

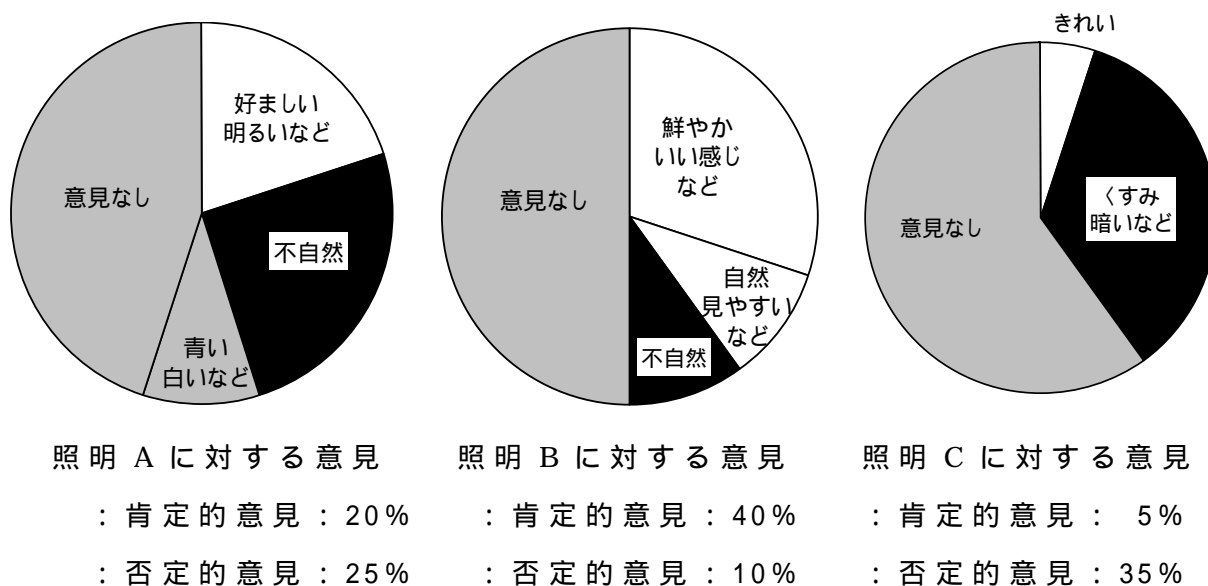


図 3.8 照明下での見えに対する自由意見の集計結果

3.2.7.4 男女の感じ方の違い

SD 法による評価結果を男女別に比較した。男女別の平均値を図 3.8 及び図 3.9 に示す。男性はほとんど全ての評価用語で照明 B > 照明 A > 照明 C の順序で評価が高く、イメージを持ってではなく、良いか悪いかだけで評価していると考えられる。一方女性は評価用語によって照明の評価が異なり、照明によって対象物の見え方のイメージの変化を男性よりも敏感に感じていることがわかる。特に「肌が健康そうに見えるか」、「肌の透明感が高いか」の二つの項目に照明による影響が最も強く現れている。

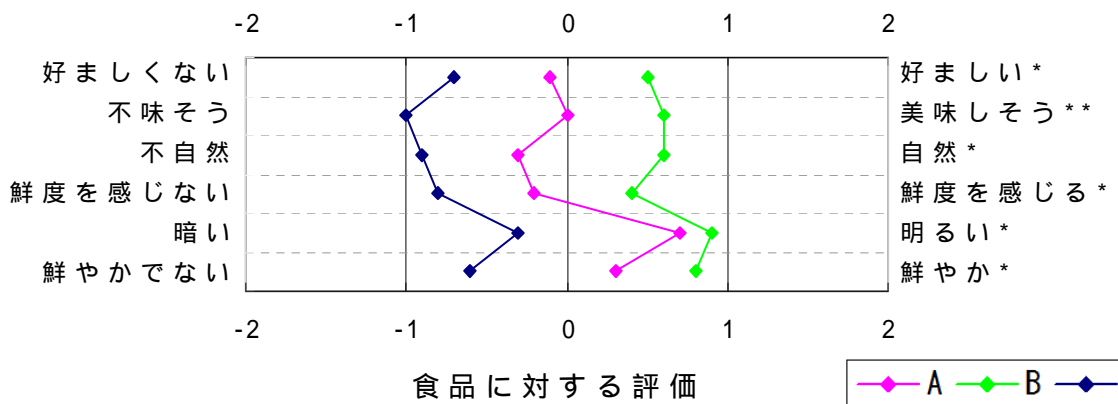
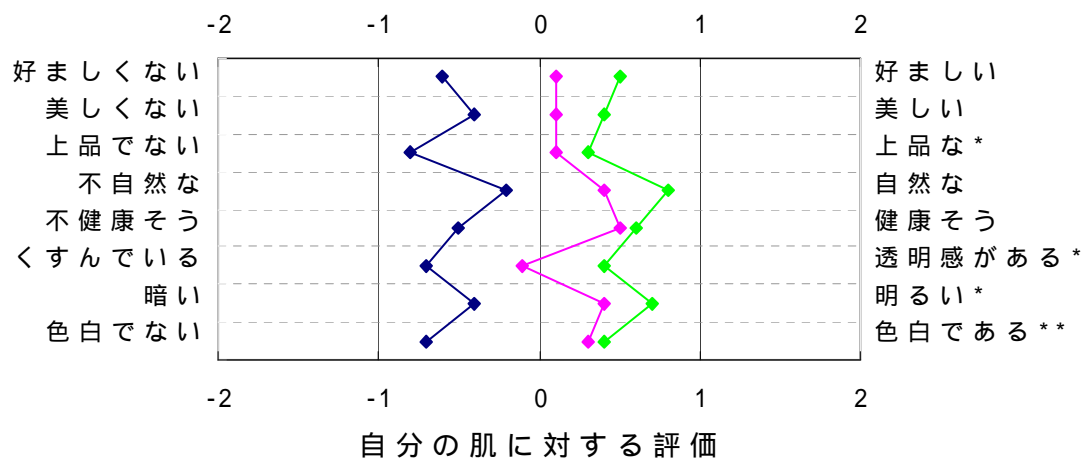
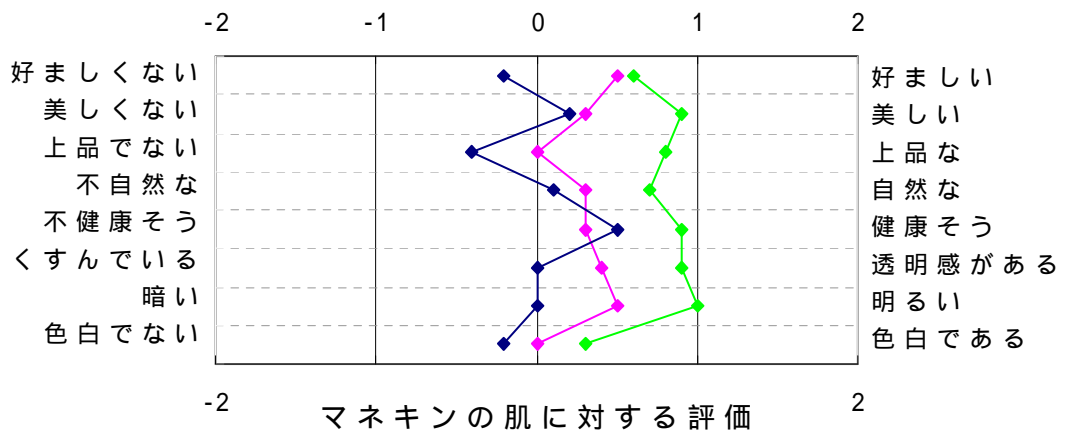


図 3.9 男性の照明による評価の違い

* : $p < 0.05$
 * : $p < 0.01$

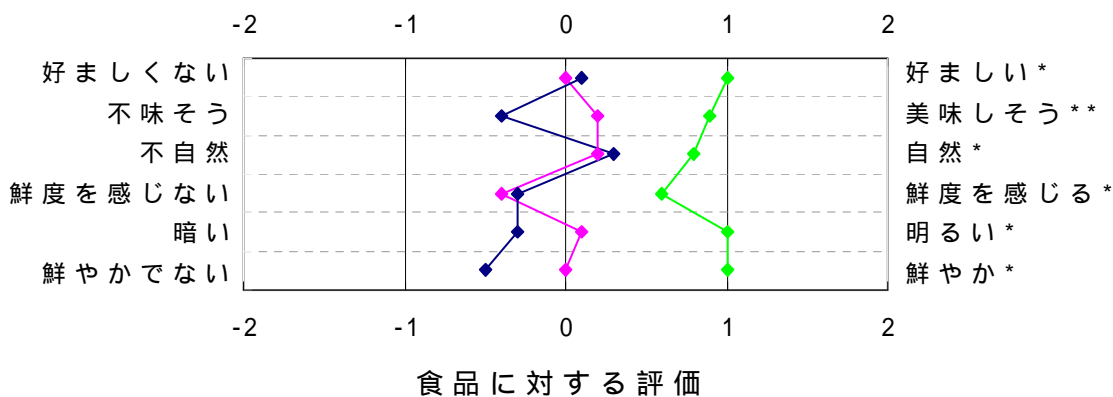
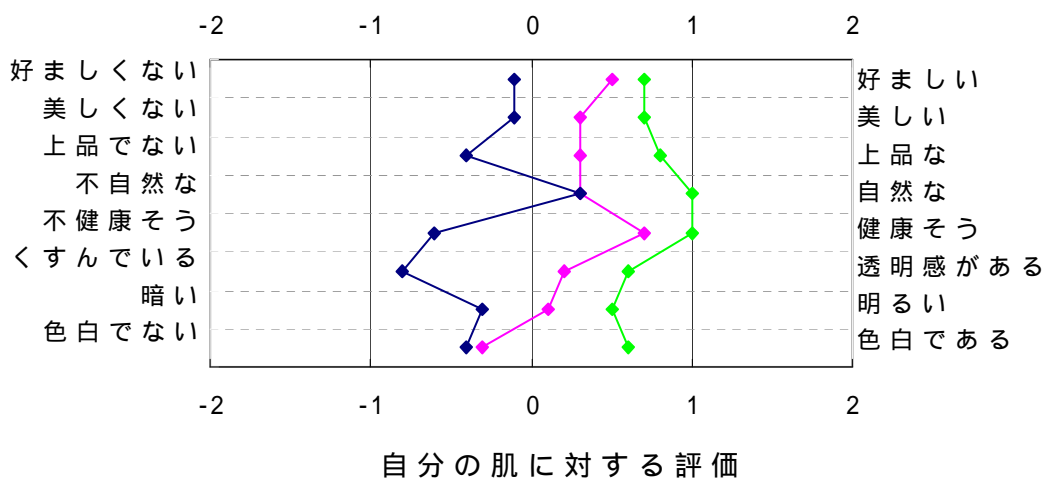
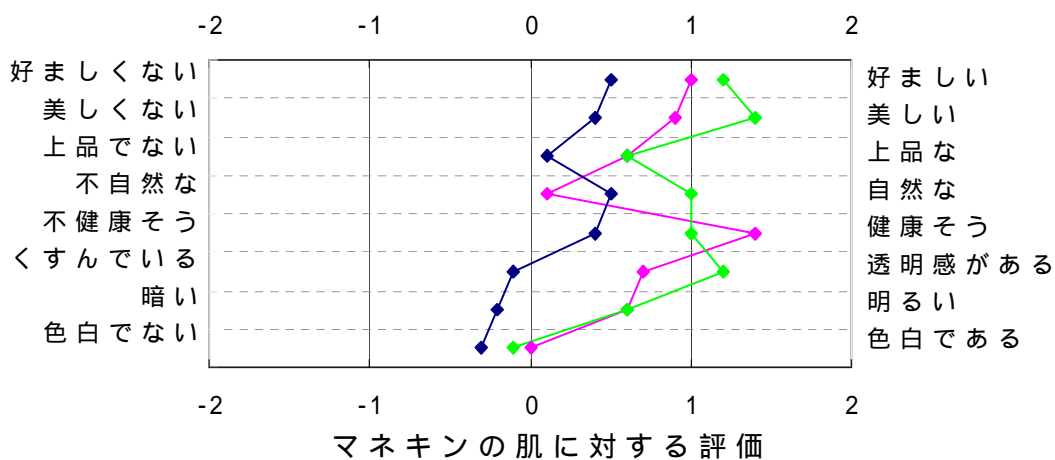


図 3.10 女性の照明による評価の違い

◆ A ◆ B ◆ C

* : $p < 0.05$
* : $p < 0.01$

以上の結果について主成分分析を行い，照明の違いによってイメージがどのように影響を受けるのかについて検討した．

表 3.3 に抽出された主成分の固有値と寄与率を示す．

表 3.3 主成分の固有値と寄与率

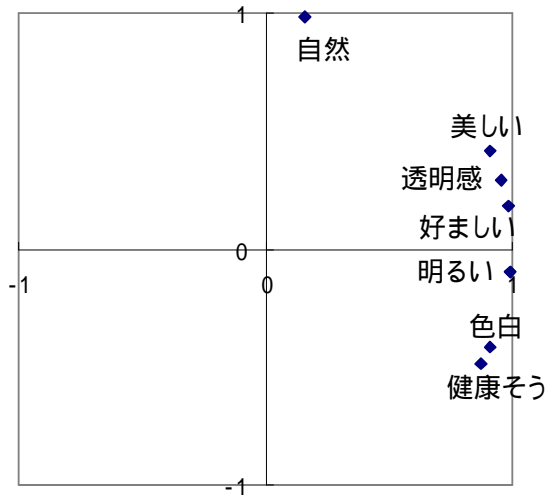
		固有値	寄与率
男性	第 1 主成分	7.841	0.980
	第 2 主成分	0.159	0.020
女性	第 1 主成分	6.309	0.789
	第 2 主成分	1.691	0.211

男性は第 2 主成分の固有値が 1 以下で寄与率がほとんど無く，本実験ではイメージ空間を持っていないことがわかった．やはり照明の違いについてはイメージではなく，良いか悪いかだけで判断していることが確認できる．女性は第 2 主成分までのイメージ空間を持っていることがわかった．

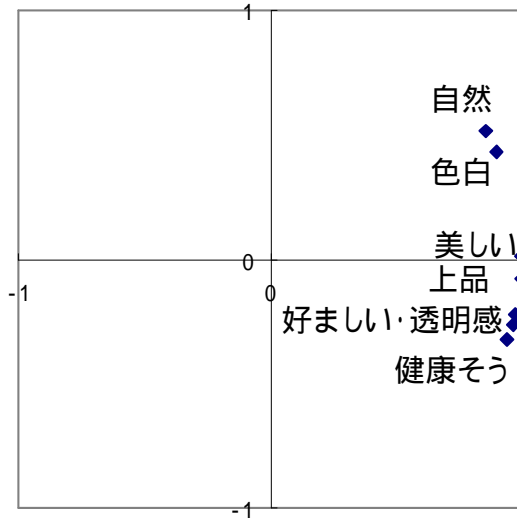
図 3.11 に女性のイメージ空間を示す．

女性は好ましさに対して透明感の相関が高く，また自分の肌においては健康そうに見えるかについても相関が高い．

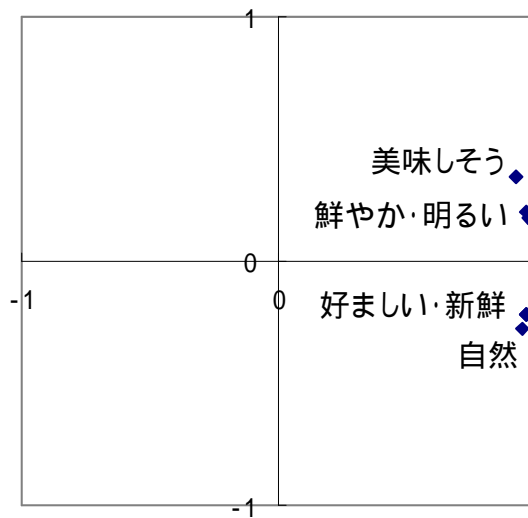
評価用語ごとのイメージの違いが比較的是っきりしているマネキンの肌に対する女性の評価を取り上げ，各照明の主成分得点によるイメージ空間上への位置づけを見たところ，図 3.12 に示したように照明 A と B の違いは自然に見えるかどうかであることがわかった．



マネキンの肌に対する評価



自分の肌に対する評価



食品に対する評価

図 3.11 女性の評価イメージ空間

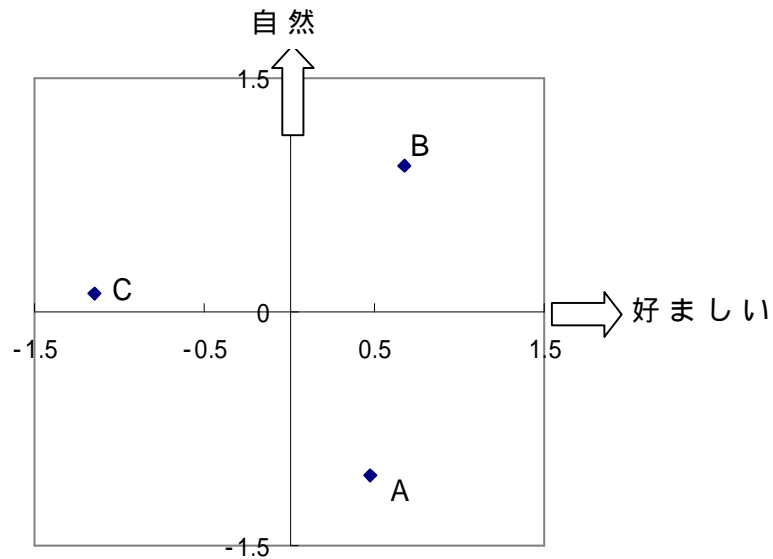


図 3.12 マネキンの肌に対する照明条件のイメージ(女性)

3.2.8 まとめ

「肌・食品の見え」に対して行った実験によって以下のことが確認できた。

- ・分光設計において 570nm 付近の強度低下は肌や食品の見えに対して評価を上げることができる
- ・570nm 付近の強度低下が大きすぎると全体的に赤っぽく見え、自然さが損なわれるので、適度な範囲を見出すことで最適な照明を得ることができる
- ・女性の方が自分の肌の見えに対して敏感に違いを感じ、肌の透明感と健康そうに見える照明を好ましく感じる

本研究において、分光分布の調整が肌や食品の見えに対して効果があることを確認できた。また、性別などの人間の属性により、ニーズの高さや種類が異なることも示された。好ましい肌の色は人種によって異なることが示されており³⁸⁾、肌の見えに対する結果は日本人における限定的な結果ではあることに注意が必要である。照明下の物の見え方の追求は照明の使われ方や目的、見る人の属性によって検討することが重要であると考えられる。

3.3 美味しそうに見せるための分光設計へのアプローチ

3.3.1 はじめに

LEDや蛍光灯は蛍光体の配合によってその分光分布を任意に調整することができる。近年，分光設計によって色度調整や色域の拡大による被照明物の見え品質の向上が図られるようになってきた³⁹⁾⁴⁰⁾。

一般的に演色性が80以上の白色LEDは青色LEDと赤や緑蛍光体との組合せによる発光形式が多く採用されている。具体的に見え品質がどの分光成分を調整することによってコントロールできるかが特定できれば，使用する蛍光体の選定や配合を的確に行い品質向上を実現することができると考えられる。

本研究では，照明の分光分布のどのような特徴が見えに影響しているかを特定することを目的とし，特徴を見出すために主成分分析を利用した試みについて報告する。見え品質として住宅や店舗でニーズが高いと考えられる「美味しそうに見えるか」について取り上げ，検討を行った。

3.3.2 実験

暗室内に設置した評価BOX内の食品サンプルに対し，基準照明を照射後，評価照明に切り替えて評価を行った。基準照明で照明された状態での評価を50点とし，評価照明の点数付けを行った。

実験用照明はNIKON多波長可変光源ELS-VISにて再現した実在する高演色タイプLEDの分光分布8種とし，被験者毎にランダムに呈示順序を変更した。図3.13に基準照明と評価照明の分光分布を示す（…：基準照明，：実験照明A~H）。また，図3.14に評価照明のxy色度を示す。色温度は昼白色に統一（4850~5000K）した。図3.15に評価に用いたサンプルの呈示状態を示す。観察面照度は150lxに調整した。

被験者は28歳~59歳（男性17名女性3名）で評価の際，対象物全体を見て判断するよう教示した。

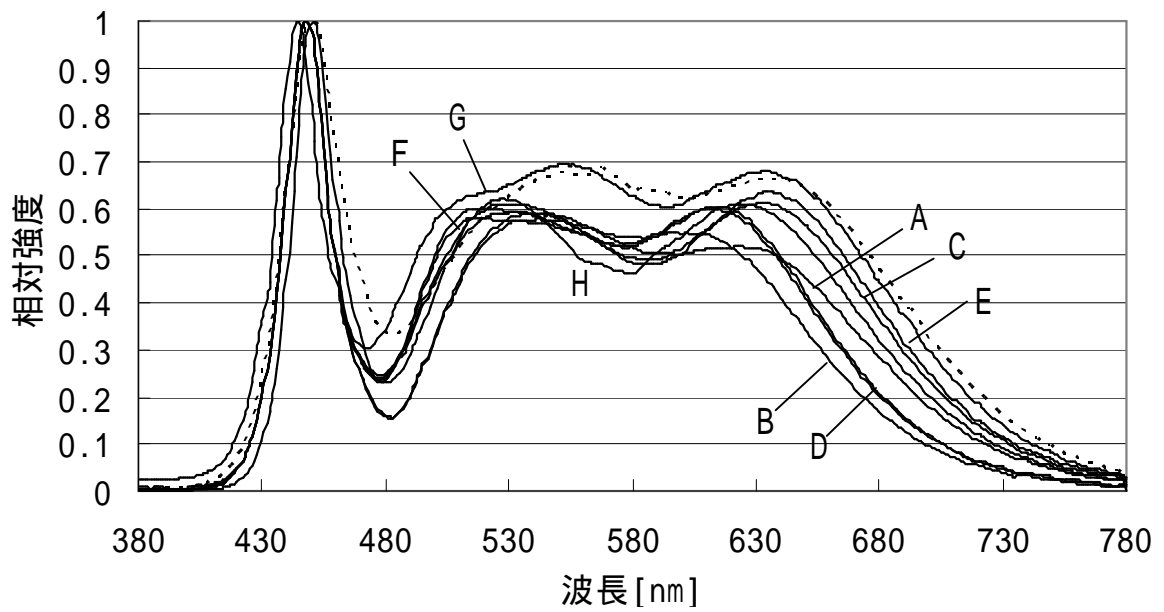


図 3.13 評価照明 8 種の分光分布

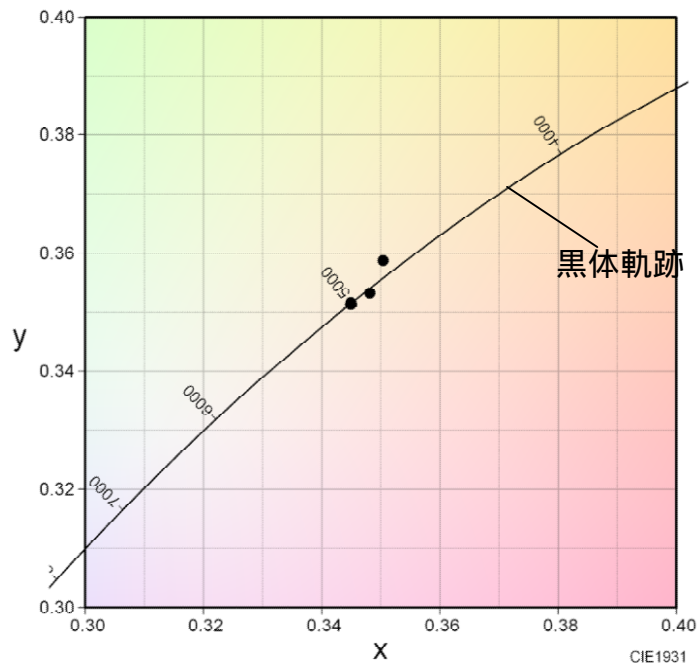


図 3.14 実験に用いた評価照明の xy 色度 (8 種が重なっている)

白い箱内にサンプルを設置

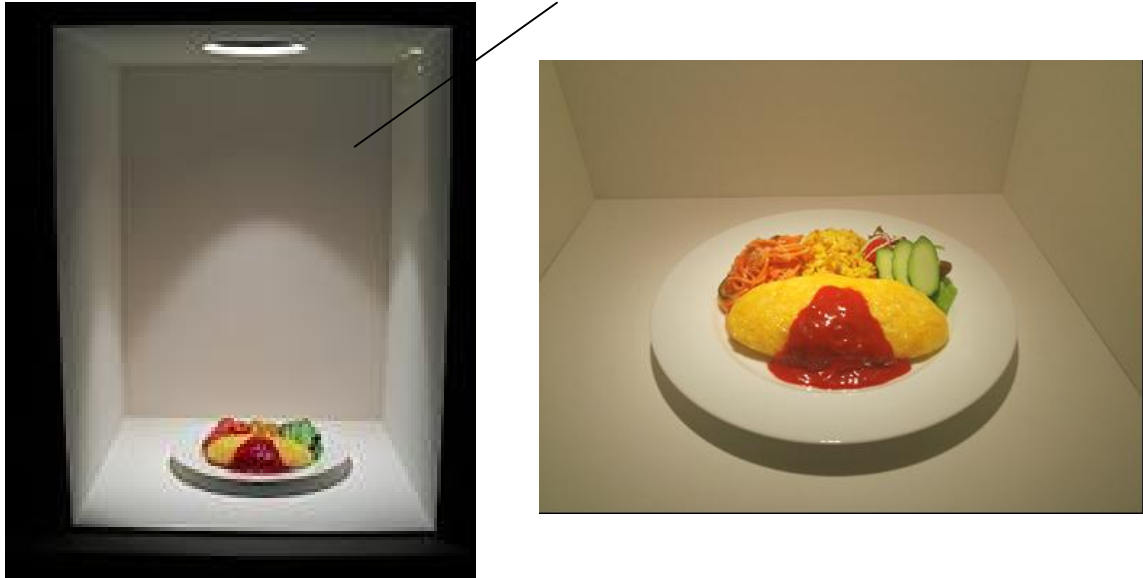


図 3.15 評価サンプル

3.3.4 結果

図 3.16 に各照明に対する点数から被験者毎の評価幅のばらつきを考慮し、個人による評価幅を基準化した結果を示す（平均で減じ、標準偏差で除す）。表 3.4 に示したように各照明サンプルに対する評価の平均値には有意差がみられ、照明の分光分布の微妙な違いによって評価結果に差があることが確認された。

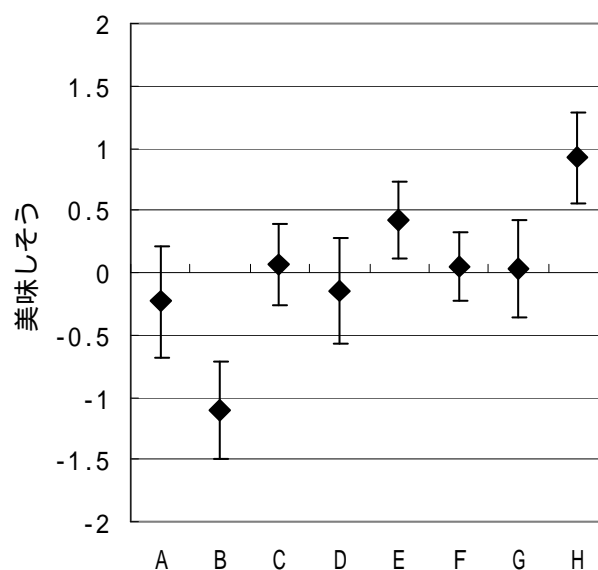


図 3.16 照明による評価結果

表 3.4 照明サンプルに対する評価の差の検定 (分散分析表)

変動要因	変動	自由度	分散	分散比	P-値	F 境界値
グループ間	46.6209	7	6.6601	10.8412	4.71E-11	2.0703
グループ内	93.3791	152	0.6143			
合計	140	159				

照明の分光分布から計算できる演色性の指標として、平均演色評価数 R_a 、特殊演色評価数 R_9 、色域面積比 $G_a^{41)}$ 、目立ち指数 $FCI^{42)}$ を計算し、「美味しそうに見える」の評価値と相関を見た。図 3.17 に結果を示す。それぞれに結果は一致する傾向を示し、演色性が高いほど、美味しそうに見えることが示された。特に相関が高かったのは色域面積比 G_a 、続いて目立ち指数 FCI であった。

以上の結果より、本実験の照度レベルにおいては色の忠実性の指標である R_a や R_9 よりも照明光によってより鮮やかに見える方が美味しそうに見えた結果となった。

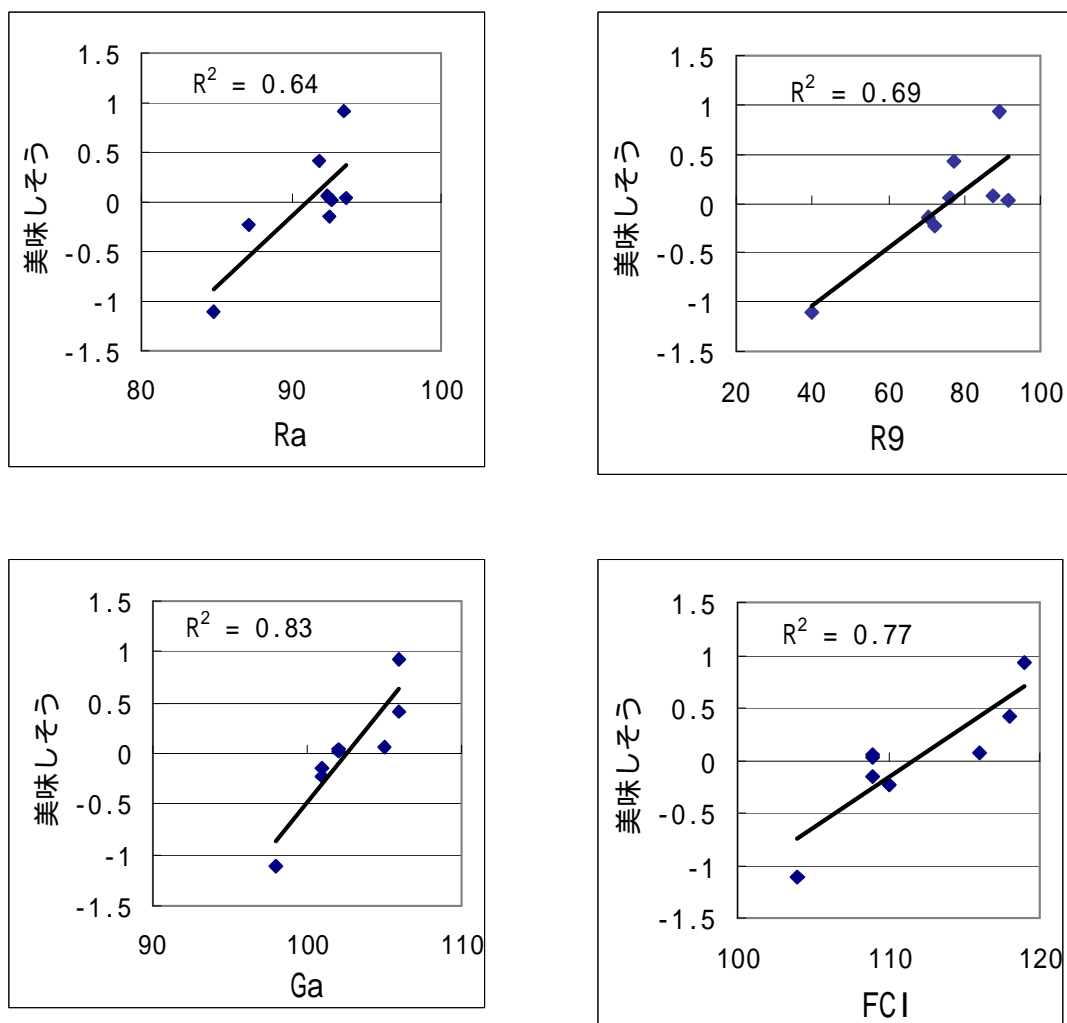


図 3.17 美味しそうに見える評価と演色性指標との関係

3.3.5 分光分布の特徴と評価との関係について

主成分分析は変数の微妙な違いを抽出する場合に有効であり，食品分野などで多く利用されている⁴³⁾．分光分布の大きな違いよりも微妙な違いを特定したい場合に非常に有効な手段であると考えられ，本研究において検討することとした．

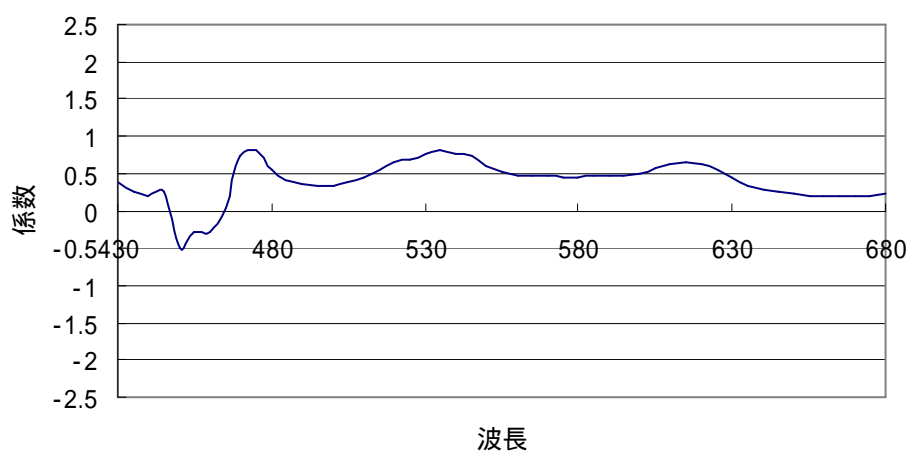
分光分布の違いの特徴を抽出するため，8種の分光分布の5nmごとの相対強度を変数として主成分分析を行った．蛍光体の励起波長部分である，430nm～680nmのデータを使用した．

主成分分析の結果，累積寄与率0.8以上で2つの主成分が抽出された．こ

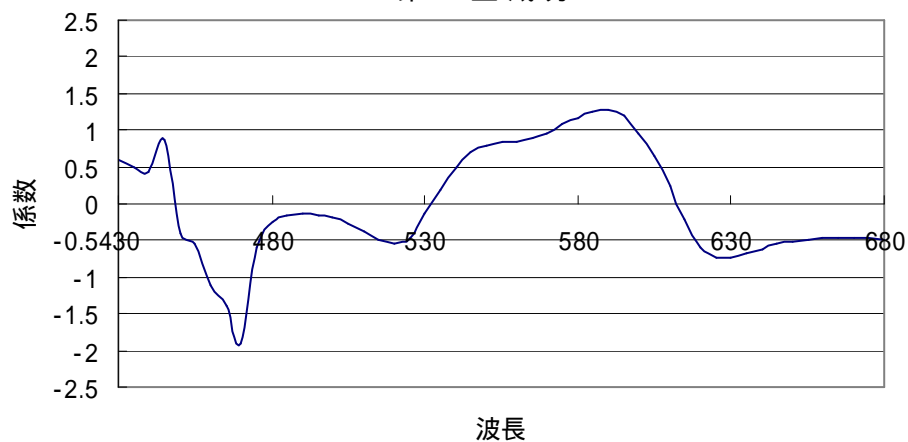
のことから，8種の評価照明の分光分布の違いは主に2つの特徴があることがわかった．結果を表3.5に示す．また，二つの主成分の係数を図3.18に示す．

表 3.5 抽出された主成分

主成分	固有値	寄与率	累積寄与率
1	29.615	0.581	0.581
2	11.501	0.226	0.806
3	6.697	0.131	0.937
4	2.049	0.040	0.978
5	1.067	0.021	0.999
6	0.071	0.001	1



第 1 主成分



第 2 主成分

図 3.18 抽出された主成分の係数

第 1 主成分として抽出された評価スペクトルの特徴の最も大きな違いは 400 ~ 630nm 付近の範囲の全体的な強度の違いであり，第 2 主成分として抽出された二番目に大きな特徴の違いは 470nm，550 ~ 600nm 付近の強度の減増であった．

これら 2 つの主成分の照明に対する主成分得点と図 3.15 に示した評価結果の点数の重回帰分析を行い，抽出された特徴が評価結果と相関性があるかを確認した．評価結果の平均と主成分得点を表 3.6 に示す．

表 3.6 評価スペクトルの美味しそうに見えるかの評価と主成分得点

評価分光分布	美味しそうの評価	第 1 主成分得点	第 2 主成分得点
A	-0.23	-0.928	0.462
B	-1.11	-1.143	1.301
C	0.07	0.025	-0.749
D	-0.14	0.562	0.818
E	0.42	0.101	-1.049
F	0.05	-0.261	0.295
G	0.03	2.064	0.484
H	0.92	-0.421	-1.563

重回帰分析の結果を表 3.7 と表 3.8 及び表 3.9 に示す．

表 3.7 重回帰分析の相関係数

相関係数 R	0.92
決定係数 R^2	0.86
標準誤差	0.260

表 3.8 分散分析表

	自由度	変動	分散	分散比	有意 F
回帰	2	1.994	0.997	14.807	0.00793
残差	5	0.337	0.067		
合計	7	2.331			

表 3.9 重回帰分析の検定結果

	係数	標準誤差	t	P-値	下限 95%	上限 95%
切片	-4.4E-05	0.0918	-0.0005	0.9996	-0.2359	0.2358
主成分 1	0.1571	0.0981	1.6018	0.1701	-0.0950	0.4093
主成分 2	-0.5101	0.0981	-5.2006	0.0035	-0.7622	-0.2579

第 2 主成分の特徴が評価結果と回帰係数が高く，第 2 主成分に見られる分光分布の特徴によって評価の違いが現れている可能性が高い．美味しそうに見える可動化の評価点と第 2 主成分との相関を図 3.19 に示す．

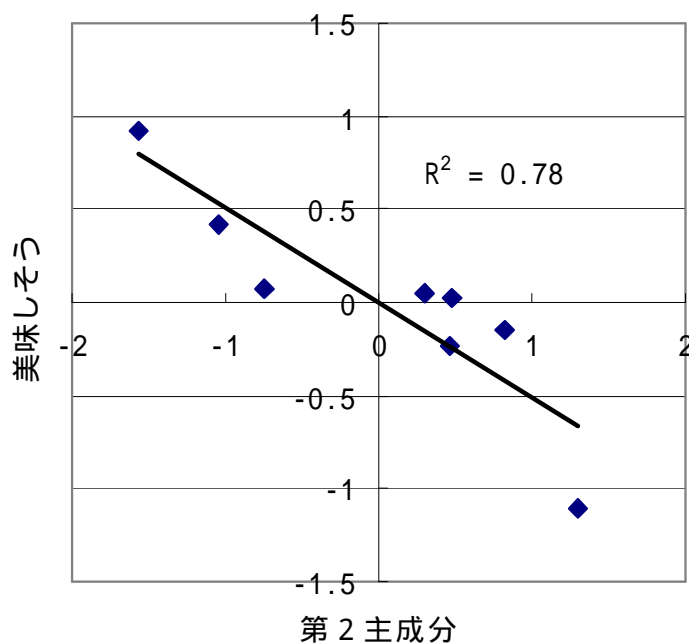


図 3.19 第 2 主成分の主成分得点と評価との相関

第 2 主成分における得点と評価に強い負の相関が確認できた．

つまり，図 3.18 の第 2 主成分の係数に対して負の効果があることになるため，食品を美味しそうに見せるための照明の分光分布は 470nm あたりの強度が高く，550～600nm 付近の強度が低い方が良いことが示された．

3.3.6 まとめ

分光分布の微妙な違いは照明品質に影響を与えることが確認できた。LEDの分光設計を行うことによってニーズに対応し、より照明品質の向上に役立つ設計ができると考えられる。

3.4 本章のまとめ

本章では見えの良さに対する影響として、人の肌の見えと食べ物が美味しそうに見えるかについて研究を行った。

実験の結果、人間は微妙な分光分布の調整による見えの違いがわかることから分光設計は対象物の見えに対して効果があることが確認できた。

また、LEDの分光分布を設計することで見えに影響を与えることができることを確認し、分光設計によってより照明下での見え方を最適にするための手段について検討を行った結果、分光分布の違いと見た目の相関を求めることで、分光設計の方向性を示すことができることを確認した。

4 心理的，生理的影響に対する光源の影響

4.1 本章のはじめに

照明品質の一つに心理的・生理的影響がある。ある照明環境に長くとどまることを考慮すると、照明の仕様による心理的・生理的快適性に対する影響が懸念される。

本章では、心理的快適性と眼疲労について取り上げ、より快適な照明環境を作るための照明条件の研究を行った。特に照明の相関色温度は影響が大きいと考えられるため、その条件によって受ける影響について着目して研究を行い、眼疲労においてはさらに同じ色温度でスペクトル形状による影響も検討した。

4.2 色温度と照度による快適性

4.2.1 はじめに

LED照明の急速な普及に伴い、店舗照明においてもLEDの導入が進んでいる。LED照明は一般的に数ミリ角のLEDパッケージを並べており、異なる色のパッケージの出力を制御することによって簡単に照明の明るさや色を変更することができる。このような調光や調色を自由に行うことができるLED照明は時間帯や季節、被照明物の変化、デザインコンセプトに応じて照明の明るさや色を変化させることが可能である。特に照明設計が重視されるような店舗照明においては、調光や調色が様々なニーズに対応できると考えられる。

LEDは自由に照度と色温度を広い範囲で変更することができるが、照度と色温度の組み合わせによって快適性が異なることが知られており、色温度が低く照度が高いと暑苦しく感じて不快、色温度が高く照度が低いと陰気に感じ不快であるといわれる⁴⁴⁾。照度や色温度の設定によっては、照明によって不快感を与えてしまう可能性がある。照度と色温度の快適範囲はKruithofによって示されており³⁾、照明設計をする際の参考値としてよく使用されている。店舗照明においても照明設計は一般的に店舗自体のコンセプトやデザイン性を重視した上で商品の種類に対する推奨色温度⁴⁵⁾や店舗種類に対する照度基準⁴⁶⁾に加え前述のKruithofの快適範囲を参考に設計が行われている。しかしながらその快適範囲は光源の演色性やシチュエーションによって必ずしも実際と一致しないことも指摘されている⁴⁷⁾⁴⁸⁾⁴⁹⁾。Kruithofの快適

範囲は生活行為を想定すると必ずしも一致しないと言われ、実際の生活行為を想定した照度と色温度の快適性について、例えば高橋の研究⁵⁰⁾によれば、比較的活動を伴う場合においては低色温度で Kruithof の快適範囲よりも高めの照度でも評価が高い結果が示されている。

また店舗照明を対象とした快適範囲の研究事例はほとんどなく、そこでは購買行為など住宅用照明とは異なる使われ方をするため、快適範囲もまた異なる可能性がある。さらに、光源の違いによって快適性範囲に影響を与える可能性が示されている⁵¹⁾ことから、LEDを実際に使った実験が重要であると考えた。

そこで本研究では店舗照明を想定し、現在市場で主流となっている2色のLEDによる調光調色照明を使った実験を行い、快適性を検討することとした。店舗は業種により大きく求められる快適性が異なるため、実験対象として飲食店と物販店を選択した。調光や調色の範囲が限定的にならないよう、飲食店については食事以外の行為も考えられる喫茶店、物販店では多くの素材を扱うインテリアショップを想定することとした。

4.2.2 実験方法

4.4.2.1 実験照明

色温度 2300[K]と 7000[K]のLEDパッケージを基板に交互に配置し、PWM調光によりそれぞれのLEDパッケージの出力をコントロールすることで照度と色温度が自由に変更できるLED照明を製作して実験に使用した。グレアを軽減するため、拡散性のあるカバーを装着した。実験照明の写真を図 4.1 に示す。



図 4.1 実験に使用した照明

4.4.2.2 実験空間の設定

実験時のレイアウトを図 4.2 に示す。快適性への身体的影響を軽減するため、被験者は腰掛けた状態で評価を行った。3.0[m]×2.0[m]の部屋の中心にテーブルを設置し、被験者の視線方向は壁の反射輝度の影響を少なくするため、壁に対して斜めになるようにした。実験照明は部屋中央に2本設置した。

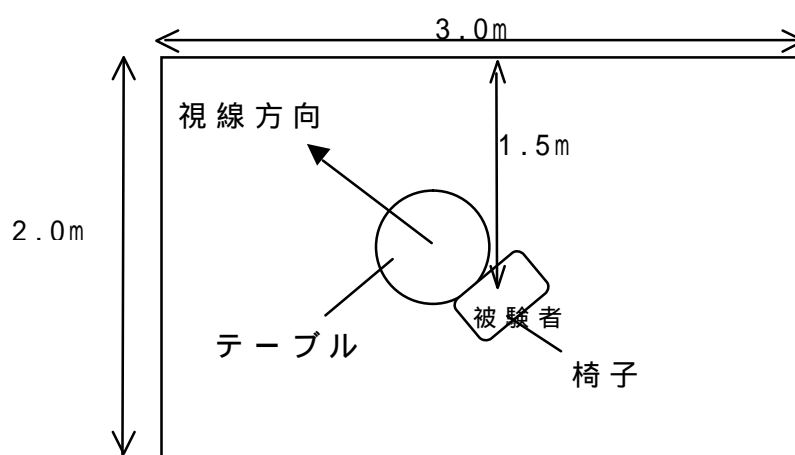


図 4.2 実験のレイアウト

被験者ができるべく実際の店舗空間にいるような状態で評価できるように、壁の色を飲食店想定ではベージュ色、物販店想定では白色に設定した。床はグレーのカーペットを敷き、照明の色が影響しないようにした。壁の色の測定値の代表値を図 4.3 に示す。喫茶店想定の実験を行う場合は、被験者は実際に喫茶をしてもらい、くつろいだ状態で実験を行った。光源が目に入らない条件で視線は自由とした。

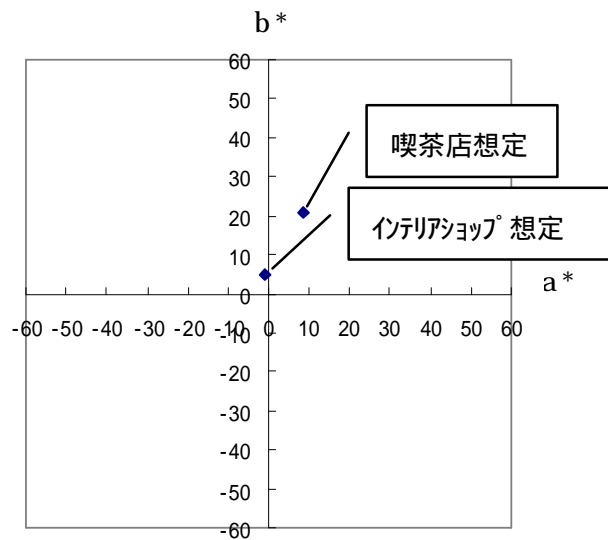


図 4.3 実験空間の壁の色（ミノルタ CM-500 にて測定）

図 4.4 に喫茶店実験時のレイアウトの概略図を示す。家具やカップなどは全て無彩色の物を用いた。

インテリアショップ想定の実験を行う場合は、実際に商品を選ぶシーンを想定して実験を行う必要があるため、様々な素材を使用した椅子や生地の写真が無彩色の紙で覆ったテーブルの上に置き、眺められるようにした。また目に入る色が偏らないようにマンセルブックオブカラーの色票から基本 10 色相の中から明度が異なる色票を 3 枚ずつ適当に選択したものを並べた。実験時のテーブル上の様子を図 4.5 に示す。

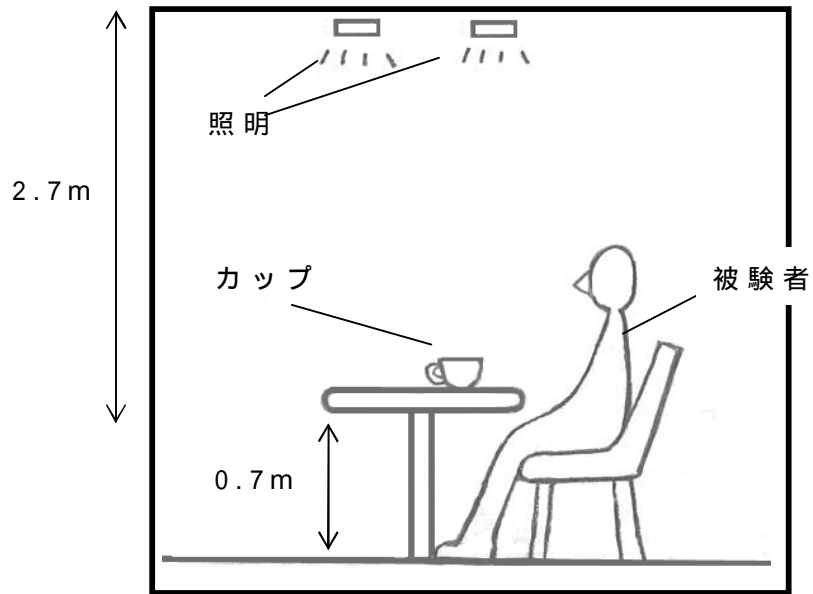


図 4.4 喫茶店を想定した実験時のレイアウト



図 4.5 インテリアショップ想定の実験に使用した写真と色票

4.2.2.3 被験者

実験に参加した被験者の性別と年代を表 4.1 に示す。

表 4.1 被験者の年齢層と人数

年齢層	喫茶店想定実験		インテリアショップ想定実験	
	男性	女性	男性	女性
20 歳代	3	3	2	2
30 歳代	7	1	9	1
40 歳代	3	1	2	1
50 歳代	1	0	1	0
60 歳代	1	0	1	0

4.2.2.4 実験条件

実験では照度と相関色温度を変化させた各照明条件で被験者に評価させた。照明条件の照度は対数間隔，相関色温度はミレッド値間隔でほぼ等間隔になるように設定した。表 4.2 に照明条件を示し，図 4.6 にその分光分布を示す。表 4.2 に示した平均演色評価数 Ra は図 4.6 の分光分布から計算した値である。

表 4.2 照明条件

相関色温度 [K] (Ra)	照度 [lx]
2400 (Ra : 73)	30
2550 (Ra : 75)	55
2700 (Ra : 76)	100
2900 (Ra : 78)	180
3100 (Ra : 79)	300
3400 (Ra : 80)	550
3700 (Ra : 81)	1000
4100 (Ra : 81)	
4500 (Ra : 79)	
5000 (Ra : 79)	
5600 (Ra : 79)	
6200 (Ra : 78)	

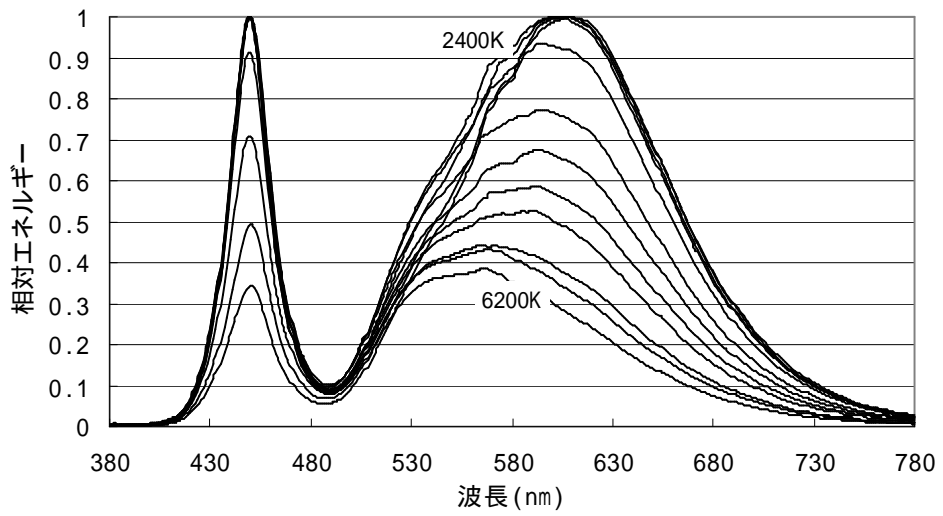


図 4.6 実験条件の分光分布

図 4.7 に Kruithof の快適範囲と共に照明条件を図示する。

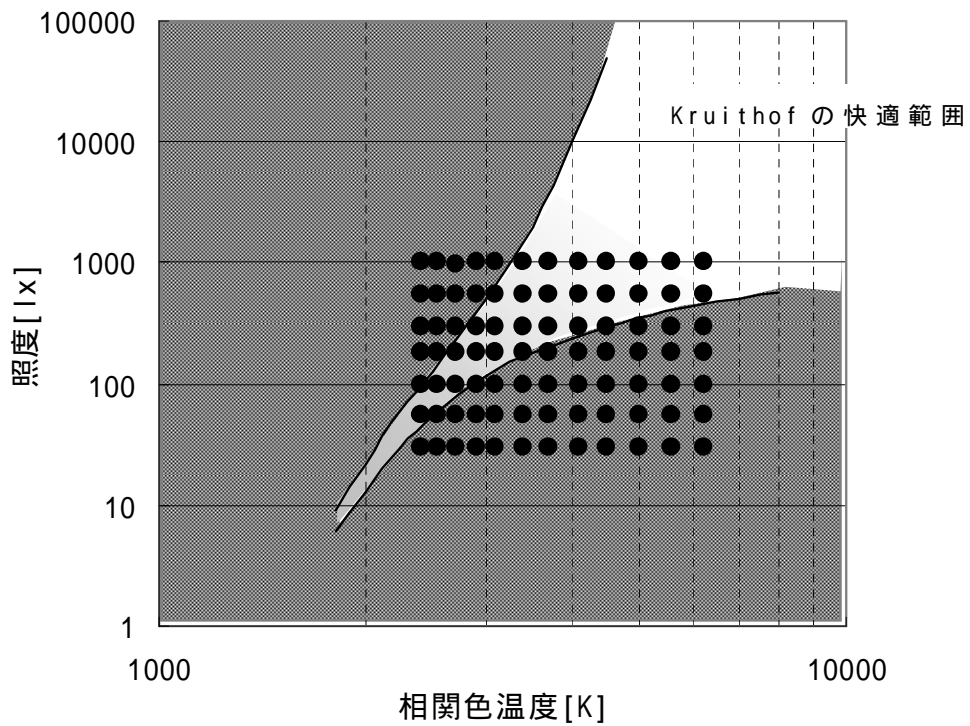


図 4.7 照度と相関色温度の条件 (: 実験したポイント)

照度は Kruithof の実験同様 , テーブル面での水平面照度であり , 相関色温度もテーブル上での測定値である . 測定はコニカミノルタ CL-200A を用いて行った . 分光分布は Carl Zeiss 製 MMS 1 UV/VIS enh にて測定を行った . また , 各相関色温度条件の色度座標 (x , y) 値を図 4.8 に示す .

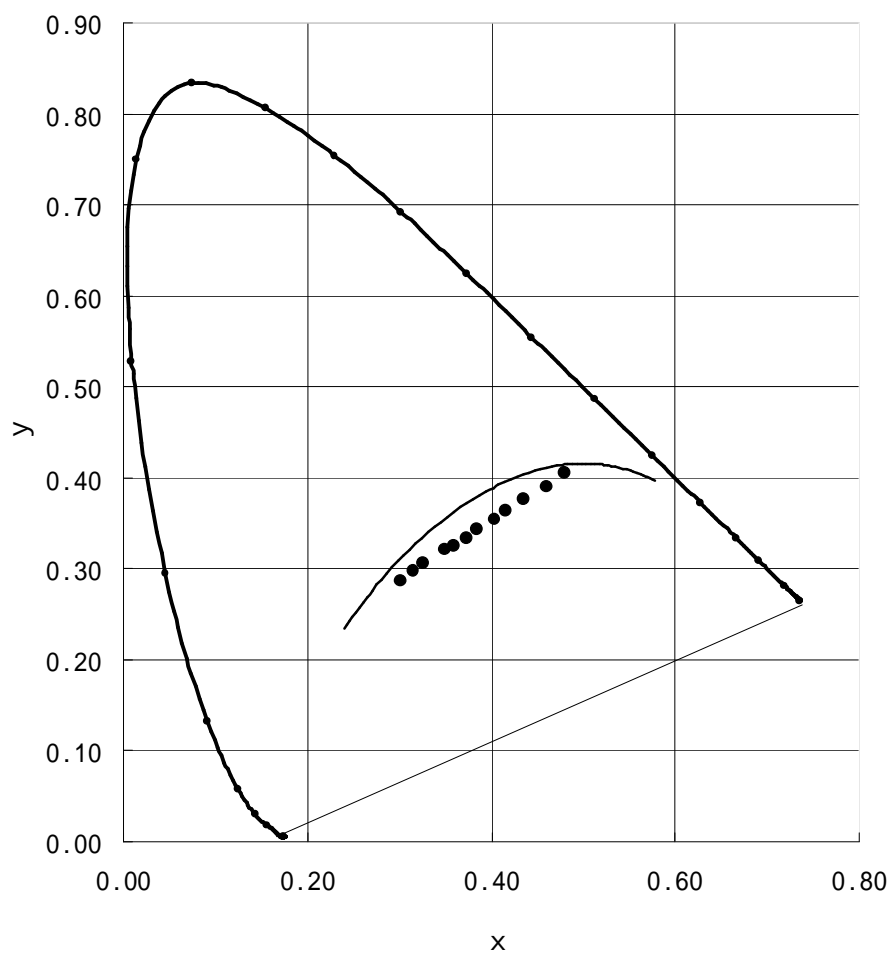


図 4.8 実験条件の色度 (実験水準)

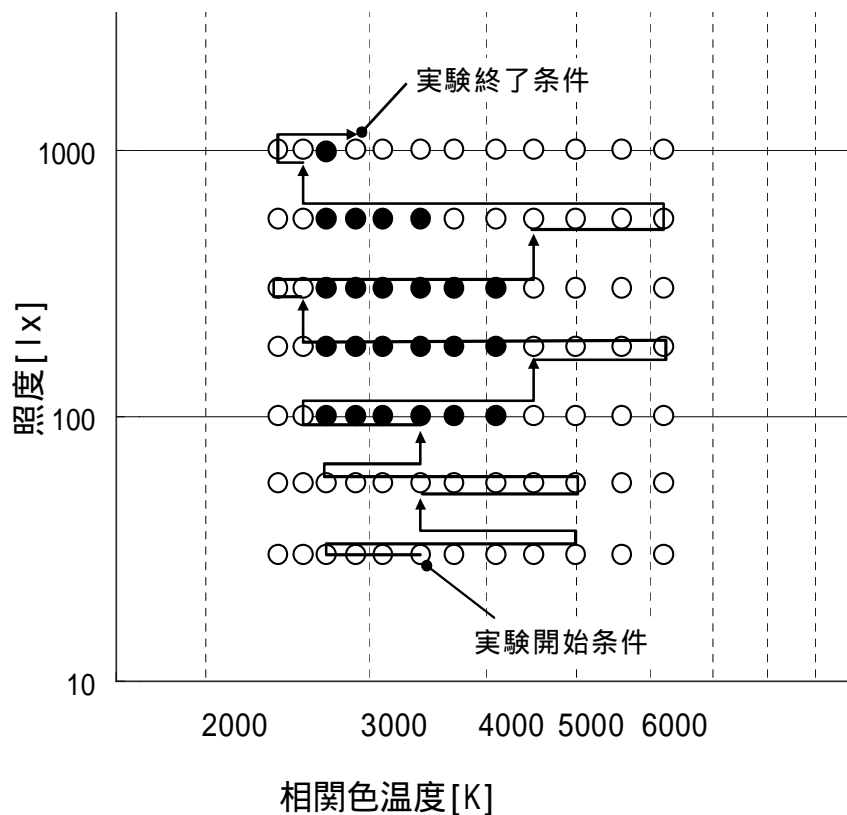


図 4.9 ある被験者に対して行った条件呈示の軌跡(喫茶店想定)
 (\longrightarrow : 呈示順序 \bullet : 快適と答えた水準)

4.2.3 実験結果

喫茶店を想定した実験の結果を図 4.10 に示す。快適範囲は Kruithof の範囲と重なる部分が多いが、高色温度、高照度の条件は快適でなく、 $100[\text{lx}]$ 以上 $500[\text{lx}]$ 以下、色温度は $2500[\text{K}] \sim 4000[\text{K}]$ 程度の範囲の中に限定された。最も快適な範囲を 8 割以上の人が快適とした範囲とすると $180[\text{lx}]$ 、 $2700[\text{K}] \sim 3100[\text{K}]$ (電球色相当に当たる) が相当する。

許容される範囲を 7 割以上の人が快適と感じる範囲とすると、Kruithof の範囲よりも低色温度側でやや高照度まで許容される可能性があり、Robert ら⁴⁷⁾や高橋⁴⁸⁾の報告の傾向と一致する。喫茶店想定では低色温度側で比較的快適な照度範囲が広く、高色温度側では照度が制限される傾向が見られた。次にインテリアショップを想定した実験の結果を図 4.11 に示す。インテリアショップを想定した場合の快適範囲は照度が $180[\text{lx}]$ 以上、色温度が $3000[\text{K}]$

~ 5000[K]と喫茶店想定よりも広がった。ほとんどの快適水準は Kruithof の快適範囲内に収まり,照度は 3500[K]から 4000[K]付近(温白色~白色相当)においては 1000[lx]以上でも快適と感じる可能性があるが,それ以上の色温度では高照度が不快に感じることがわかった。インテリアショップにおいては喫茶店とは異なり,低色温度側での照度許容範囲が狭いことがわかった。

この評価の理由について被験者から得た自由回答から,低い色温度や低い照度は購買行為において,対象の色が見難いため評価が低いと考えられる。また高い色温度ではまぶしさ感を感じるため,高い照度の評価が低かったという意見が多かった。

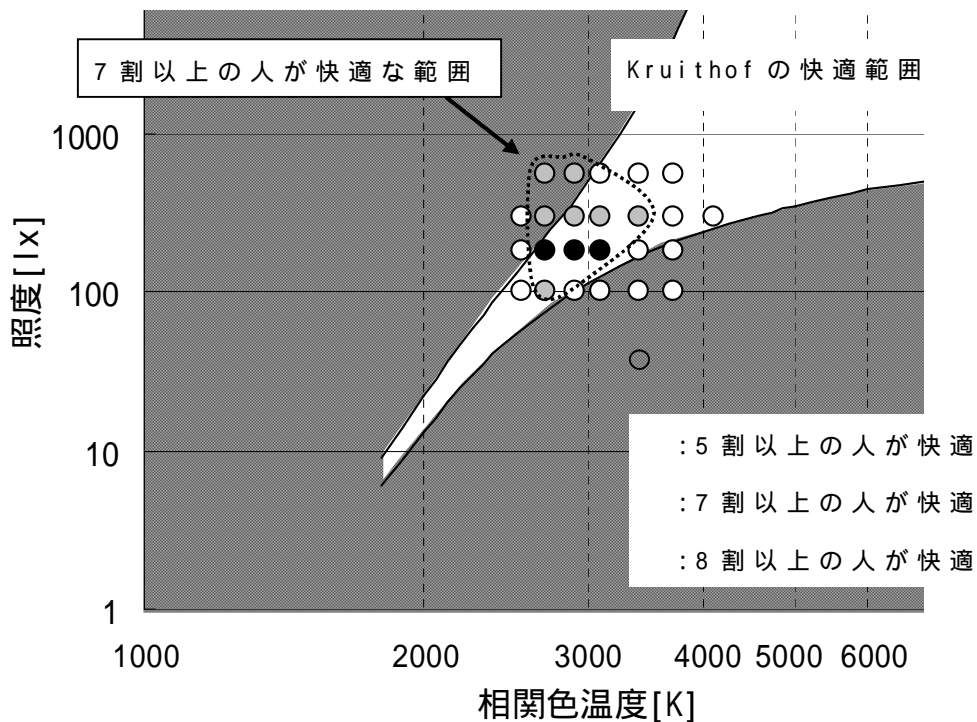


図 4.10 喫茶店を想定した時の快適範囲

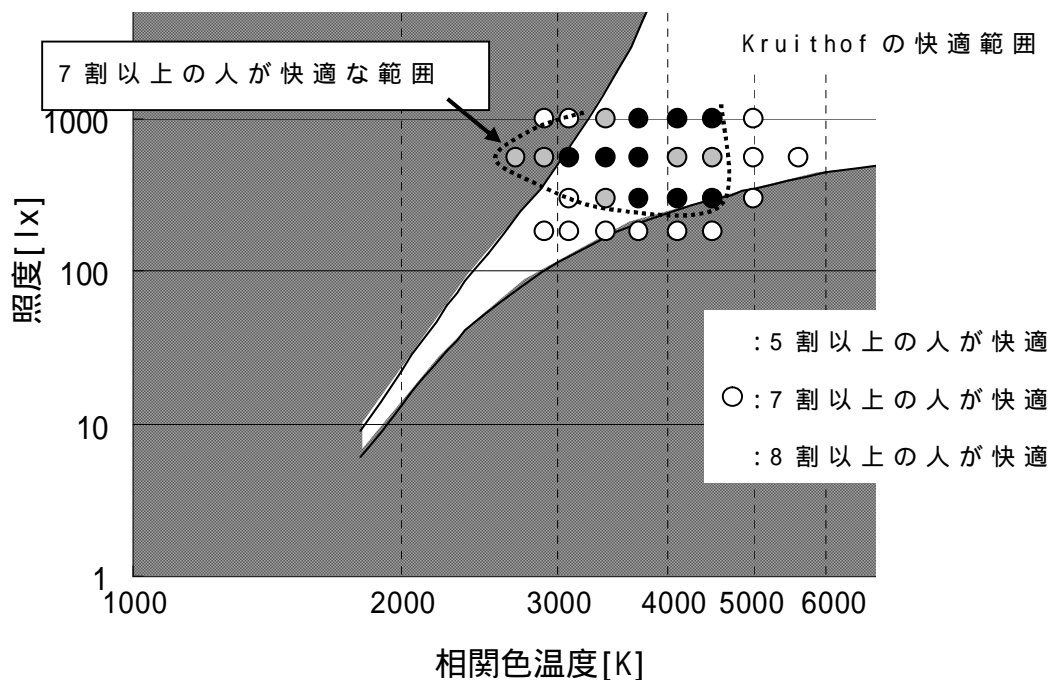


図 4.11 インテリアショップを想定した時の快適範囲

4.2.4 おわりに

本研究では飲食店，物販店における快適照度，色温度範囲を明確にする試みを行い，限定的ではあるが参考値を示すことができた。

飲食店における快適範囲は生活行為の団樂や食事を想定した場合の研究結果⁴⁸⁾⁴⁹⁾と同様に，色温度が低い条件でも Kruithof の快適範囲よりやや照度が高い条件で快適と示された。快適な色温度は電球色相当であり，一般的に飲食店で多く使用されている光色と一致する。3000K を超える場合は照度設定に注意が必要であると考えられる。

物販店における快適範囲は比較的広く，快適な色温度は温白色から白色相当であり，その色温度においては実験水準である 1000[lx]以上でも快適であると考えられる。電球色の場合は照度が低いと色が見えにくく，高いと違和感をおぼえるため，使用する場合は照度がかなり限定される。昼白色相当以上を使用する場合はまぶしさ感を抑える工夫が必要と考えられる。

本研究で示した店舗の業種による照明の照度と色温度の快適範囲が異なる結果から，LED 照明の制御しやすさを照明設計に有効利用することは，より最適な照明環境を作り出す手助けの一つになると考えられる。

4.3 眼疲労への分光分布の影響

4.3.1 はじめに

オフィスや学校などの施設向け照明において蛍光灯からLED照明に置き換えるリニューアルが多く行われている。そこでは長時間の視作業を人工照明下で行う場合も多く考えられる。オフィス作業においてはモニターによる視作業が多いが、紙上の作業も少なくなく、学校においてはほとんどの視作業が紙上でなされる。紙上の視作業では眼に入る光は照明光が紙に反射した光であり、VDT作業よりも照明の影響が大きい。そこで紙上の作業を想定し、眼疲労に対する照明光源の影響について検討することとした。

また、蛍光灯とLEDでは同じ色温度でも分光分布が大きく異なる。眼疲労に対する光源の違いによる影響についてはいくつかの報告があり、望月らによる光源の分光分布の疲労に与える研究⁵²⁾ではVDT作業においても照明の色温度の違いによって作業性に影響があったことが示されている。小谷らは照明光の色温度が低い方が、また交流点灯よりも直流点灯の方が疲労が低い傾向から、分光分布や点灯方式の相違により眼疲労への影響が異なることを示唆している⁵³⁾。

視作業による眼疲労は主に毛様体筋、外眼筋、虹彩筋等の眼筋の疲労、及び大脳皮質の疲労が考えられる。それぞれの疲労が複合的に起こり、視覚症状として現れると考えられる。眼疲労の測定方法には焦点調節応答時間 (Accommodation Response Time: 以下ARTとする)⁵²⁾、臨界周波数 (CFF)⁵²⁾⁵⁴⁾、視力⁵⁴⁾、近点距離⁵⁴⁾、瞳孔径⁵⁵⁾、視覚誘発電位 (VEP)⁵⁶⁾などがあるが、視力低下や近点距離の延長は比較的眼筋の疲労、CFFの増加やVEPの反応は大脳皮質の疲労、ARTの延長や瞳孔径の変化時間などは眼筋と大脳皮質の疲労が両方現れると考えられる。

岡本らが述べるように⁵⁵⁾光環境が眼疲労に及ぼす影響の評価方法は確立されているとは言えない。東らは文字の集合体を凝視する作業による眼疲労をARTの延長で測定した⁵⁷⁾。しかし紙を使った業務や学習作業で一点を長時間固視する場面が頻繁に生じることは考えにくい。そこで、本研究では照明の分光分布による眼疲労への影響を検討するために、まず紙上の作業を想定した眼疲労の測定方法について検討を行った。その測定方法の有効性が確認

できた後に，異なる分光分布を持つ照明下で視作業前後の視機能の変化を測定することで眼疲労に対する分光分布の影響を明確にすることを試みた．

4.3.2 眼疲労測定方法の検討

視作業前後での視機能を測定し，機能低下によって眼疲労を測定することを試みた．照明条件による違いを測定できるかについても検討を行った．

4.3.2.1 視機能の測定方法

毛様体筋や外眼筋，虹彩筋など眼筋の疲労は焦点調節力や視力に影響を与えると考えられ，大脳皮質の疲労は臨界周波数に影響を与えるととして，様々な測定方法が試みられている⁵⁸⁾⁻⁶⁰⁾．これに基づいて選択した測定機器と計測内容を表 4.3 及び図 4.12～図 4.14 に示す．視作業による一時的な眼の疲労状態はすぐに回復してしまうことから，視作業後の測定はなるべくすみやかに行う必要があるため，短時間で行えるような測定手順とした．

表 4.3 使用機器と測定内容

測定器	項目	測定内容
アコモドポリレコーダー (興和(株)HS-9E)	近点距離	焦点が合う限界の近点
	遠点距離	焦点が合う限界の遠点
	焦点調節応答時間	遠点から近点，近点から遠点に視票を動かした時の焦点が合うまでの時間
デジタルフリッカー (竹井機器工業(株)製)	臨界融合周波数	点滅が見えなくなる周波数と点滅が見え始める周波数
コントラスト感度 テストチャート (18インチ用) (Stereo Optical Co., Inc.製)	コントラスト感度	空間周波数毎の縞方向が確認できるコントラスト



図 4.12 アコモドポリレコーダー



図 4.13 デジタルフリッカー

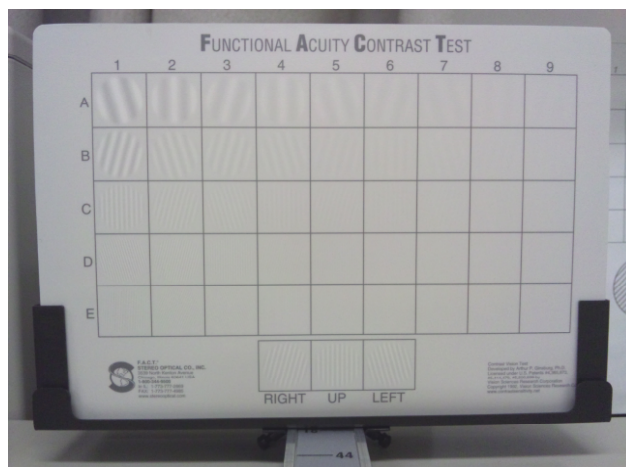


図 4.14 コントラストテストチャート

アコモドポリレコーダーで行う焦点調節時間の測定は被験者一人一人の焦点が合う位置で視標を遠点から近点へ，もしくは近点から遠点に急激に切り替え，焦点が合うと同時にスイッチを押し，かかった時間を測定する．10回以上繰り返し、少なくとも6回以上の正常値で平均した．

デジタルフリッカーで測定する臨界融合周波数はできるだけ短時間での測定を行うため，上昇系列，下降系列3回ずつの合計6回の測定で平均値を求めた．

コントラスト感度の測定はテストチャート面での水平面照度 600[lx]での環境で視距離を 46cm に固定して行った．被験者には空間周波数毎に確実に見えるコントラストから順番に縞模様の方角を回答させ，コントラスト感度を求めた．

4.3.2.2 実験環境

実験環境は暗幕で外光を遮断した部屋を使用し，前室で視機能の測定，後室（視作業室）で実験照明下での視作業を行った．前室の照明はラピッドスタート式3波長形昼白色蛍光灯を設置した．前室の机上面照度は 550[lx]であった．

4.3.2.3 実験照明

表 4.4 に本研究において比較した照明の特性を示す．いずれも 1200mm 直管形のランプを使用した．視環境として厳しい条件とするため，通常の視作業の照度レベルよりも低い照度 220[lx]で統一した．蛍光灯は一般にオフィスや学校で使用されているラピッドスタート式3波長域発光形のものを使用した．相関色温度の条件として（以降色温度とする），5000K（昼白色）と 6500K（昼光色）で実験を行った．

表 4.4 実験に使用した照明の特性

光源	色温度	Ra	分光分布
蛍光灯	5000K	83	
	6500K	84	
LED	5000K	82	
	6500K	81	

4.3.2.4 実験に用いた視作業課題

視作業課題として、長時間継続してもなるべく集中力が保たれるものを選択する必要がある。紙と鉛筆による点つなぎ作業は図 4.15 のように紙上に記された点を数字の昇順につないで図形を作るものである。一般的に視覚認知トレーニングなどによく用いられる課題であり、単純作業でありながら最終的に図形を完成させることから、同一作業の繰り返しよりは被験者の精神的負担が少ないものとして選択した。

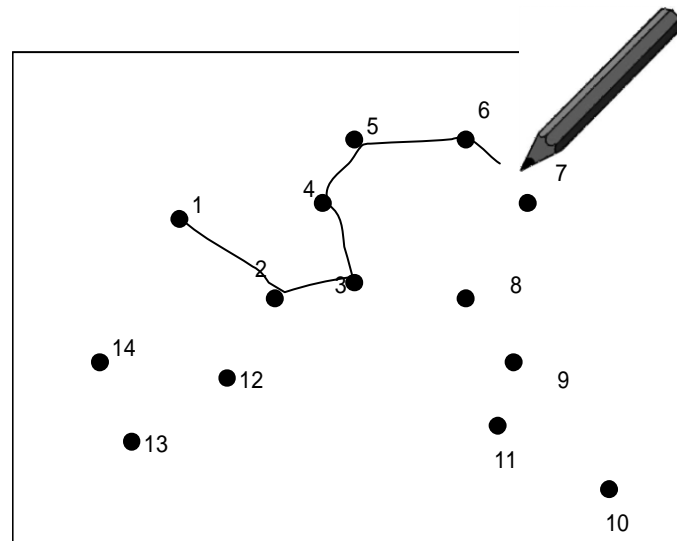


図 4.15 点つなぎの例

課題は一般的なコピー用紙に白黒で課題を印刷した物であり、各照明下で実験条件の照度 220 [lx]での紙の輝度を測定した結果を表 4.5 に示す。

この視作業による眼疲労は、連続的に近点に焦点が固定され、毛様体筋と虹彩筋が緊張状態を保ったままになることから引き起こされるパターンと、視覚的探索を連続的に行うことから眼球運動による外眼筋の疲労と視覚刺激による大脳皮質の疲労が引き起こされるパターンが考えられる。視作業時間は60分連続とし、課題は1枚につき点の数が100個から200個程度のものを多数枚使用し、実験の順序効果の影響を受けないように照明条件ごとに異なる課題を使用した。

表 4.5 実験照明下での紙の輝度

相関色温度 [K]	蛍光ランプ		LED	
	5000	6500	5000	6500
紙面輝度 [cd/m^2]	18.85	18.22	17.45	18.67

4.3.2.5 実験手順

被験者は視作業前に前室で視機能の測定を実施し，視作業室に入って視作業を 60 分間行う．視作業時間が長いため、視距離は固定せず比較的自由的な姿勢で作業を行った．視作業の様子を図 4.16 に示す．視作業を終了後，速やかに前室に戻り視機能測定を行った．その後，疲労感と視作業中の環境についてのアンケートに答えた．異なる照明条件での実験は前条件の 1 週間以上後に行い，前条件の眼疲労がなるべく影響しないようにした．



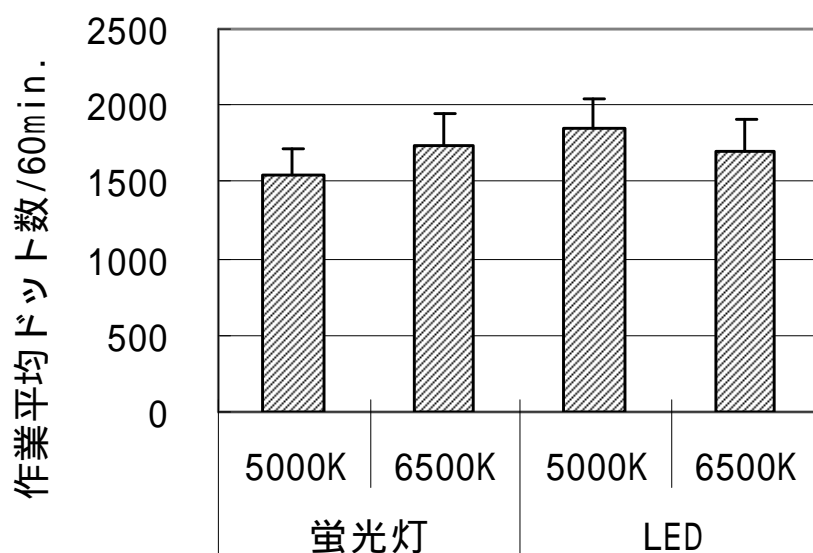
図 4.16 視作業の様子

4.3.2.6 被験者

被験者は18歳～29歳の大学生の男女（男性15名，女性10名）25名である。被験者の視矯正は通常授業を受ける際と同じとした。視力測定はランドルト環3m用視力表を用いた。半数以上の被験者が矯正を行っており，全員0.7以上の視力を有していた。

4.3.2.7 結果

1時間の実験時間中の達成した作業量は実験の繰り返しによる被験者の習熟によって，図4.17に示したようにやや増加が見られた（エラーバーは95%信頼区間）。



囲み数字は実験順序

図 4.17 各照明下での実験時の視作業量達成量

4.3.2.7.1 調節力

計測した近点距離と遠点距離から以下の式によって焦点の調節力を求める。

$$\text{調節力 [D]} = (1 / \text{近点距離}) - (1 / \text{遠点距離}) \cdots (\text{式 1})$$

式 1 で求められる調節力について各照明条件における視作業前後の調節力について欠損値やはずれ値のない 23 名 (男性 13 名, 女性 10 名) の平均値を図 4.18 に示す (エラーバーは 95% 信頼区間)。すべての照明において視作業前に対して 5% ~ 15% 調節力が低下し, *t* 検定において有意差が見られた。東らはディスプレイ作業の前後での調整力低下を報告しており⁵⁷⁾, 本研究の結果は紙上の連続的視覚探索作業においても眼疲労が焦点調節力の低下に現れることを示した。

図 4.18 において照明条件の視作業前の平均値が異なっており, その差は分散分析で 5% 有意であった。5000K 蛍光灯の照明条件において, 視作業後も調節力が他条件よりも高いことから, 実験期間の生活状態によって被験者全体の実験前の眼の疲労状態が低かった可能性が考えられる。もしくは各照明条件の実験間隔を 1 週間設けたが, 最初に実験を行った 5000K の蛍光灯の調節力が高い結果から順序効果も懸念される。そのため視作業前を基準とし, 視作業後の低下率の平均値を求めた結果を図 4.19 に示す (エラーバーは 95% 信頼区間)。6500K の蛍光灯は 20% もの調節力低下が見られ, 統計的有意差はないが同じ相関色温度 LED の 2 倍近い。色温度が高い方が疲労する傾向が見られた。中浦らは単色光の波長の違いによって ART で表される焦点調節の応答が影響を受けることを示している⁶¹⁾ ため, 照明の波長成分の影響も考えられる。表 4.5 に示した紙面輝度の違いとの関連性や図 4.17 に示した作業量との関連性は見られなかった。調節力の測定により, 照明条件による眼疲労の違いも検出できると考えられる。

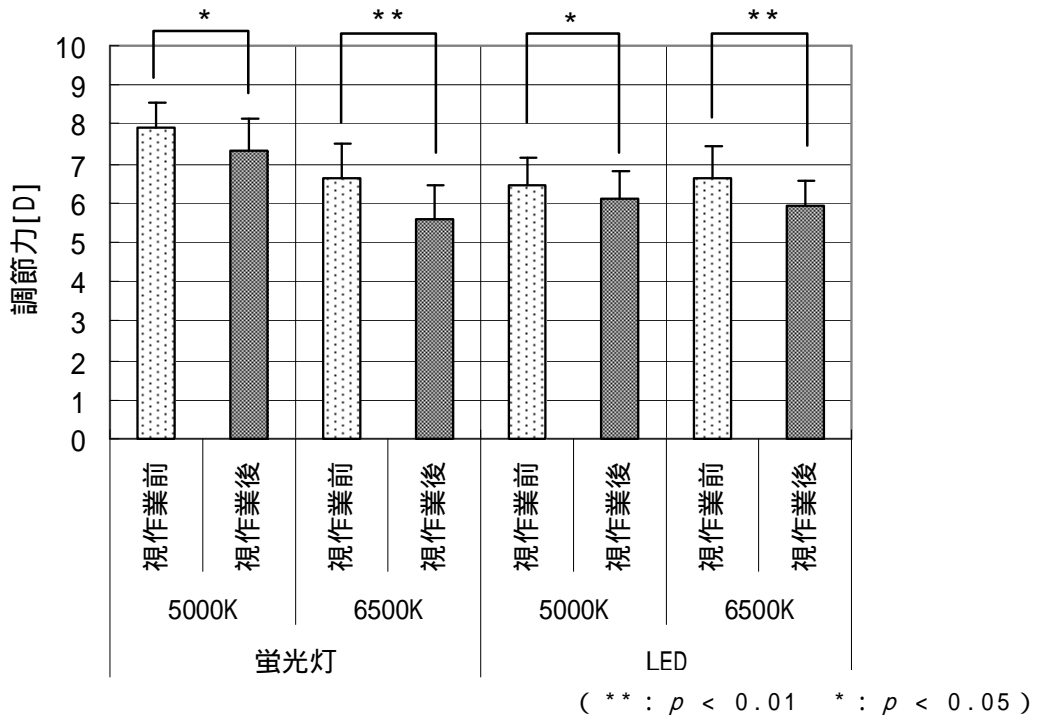


図 4.18 各照明下での視作業による調節力の変化

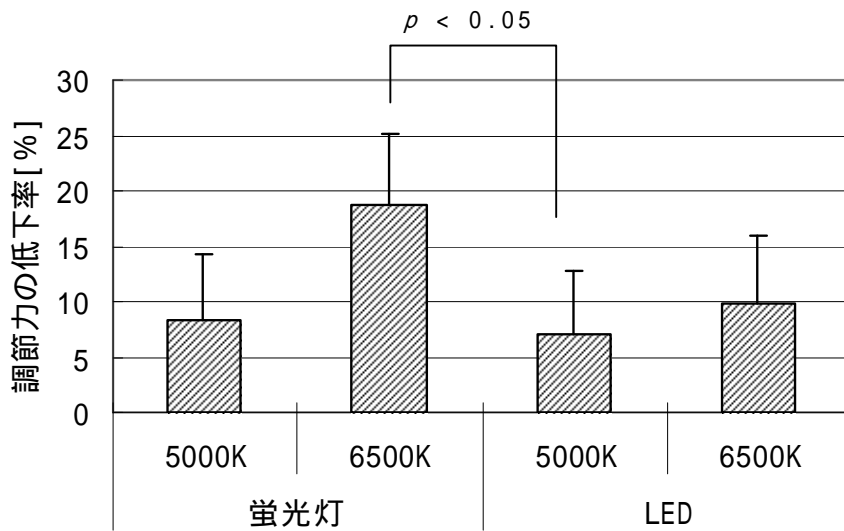


図 4.19 各照明下での視作業による調節力の低下率

4.3.2.7.2 焦点調節応答時間

遠点から近点への調節を調節緊張といい，近点から遠点への調節を調節弛緩という。被験者 25 名の調節緊張の視作業前後の ART の平均値を図 4.20 に，調節弛緩の ART 平均値を図 4.21 に示す（エラーバーは 95% 信頼区間）。どちらとも視作業により，有意に時間が延長しており，焦点調節力の低下は応答時間にも現れることが確認できた。

照明条件による視作業後 ART の増加率を図 4.22 に示す（エラーバーは 95% 信頼区間）。やや蛍光灯の方が視作業後に時間の延長率が高い傾向が見受けられるものの，個人差が非常に大きく照明条件の違いを統計的に有意に検出することはできなかった。アコモドポリレコーダーでの焦点調節応答時間計測には視票に焦点があってからスイッチを押すまでの反応時間が含まれており，認知と反応の両方に個人差が出てしまい，精度の良い測定が困難であったと考えられる。

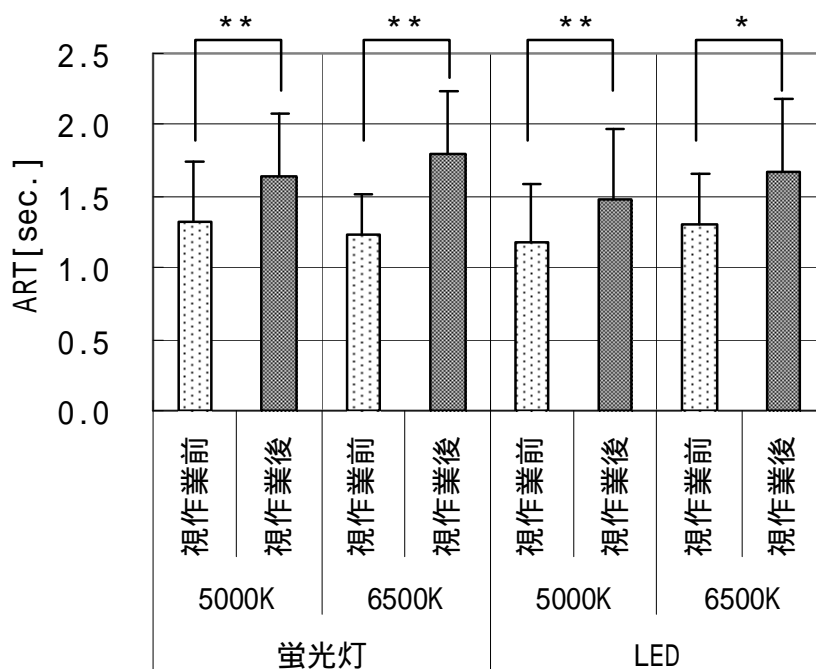


図 4.20 視作業前後の調節緊張 ART
 ** : $p < 0.01$ * : $p < 0.05$

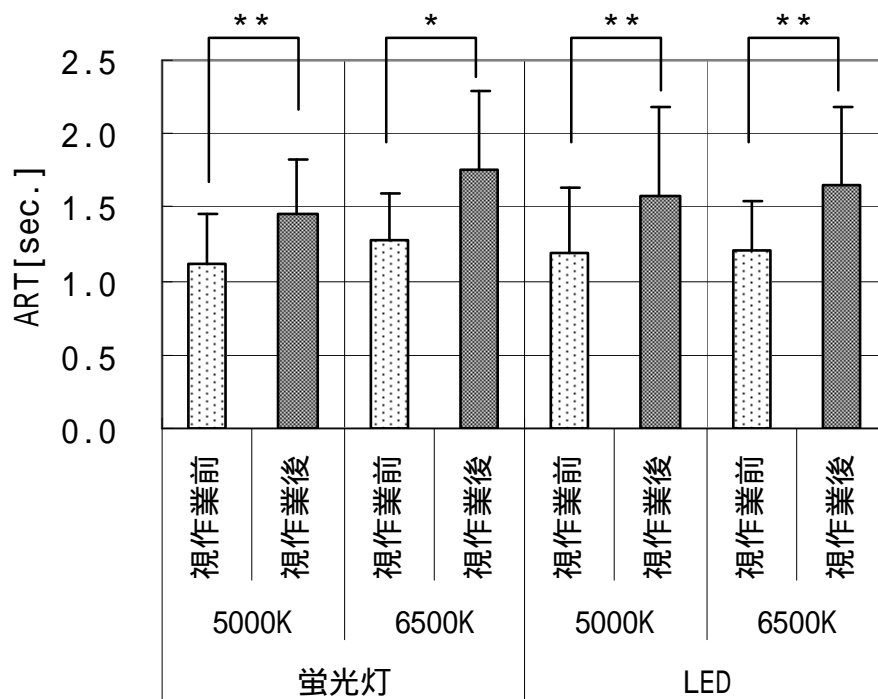


図 4.21 視作業前後の調節弛緩 ART
 **: $p < 0.01$ * : $p < 0.05$

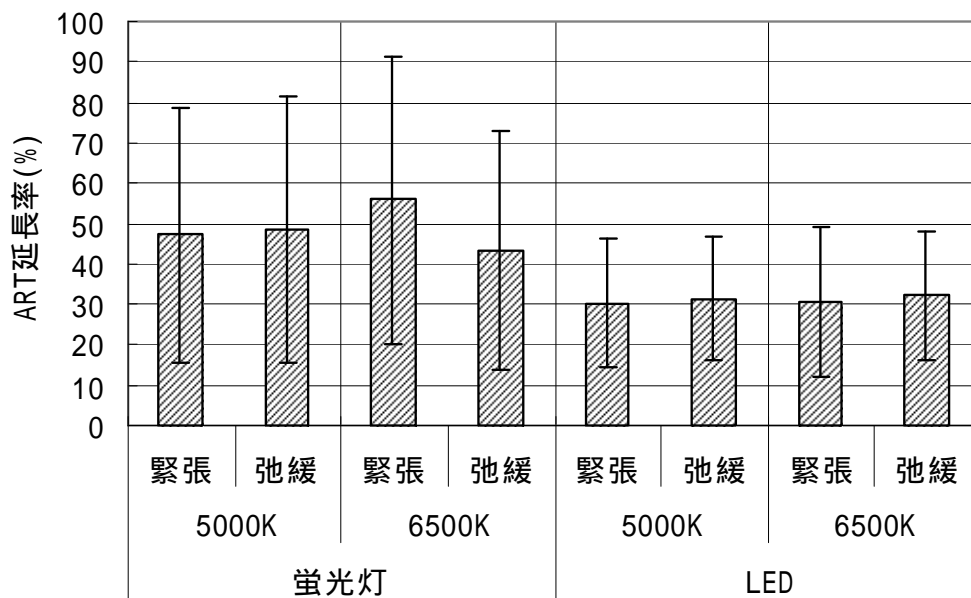


図 4.22 照明条件に対する ART の視作業による延長率

4.3.2.7.3 臨界融合周波数

視作業前後の臨界融合周波数 (CFF) を上昇系列 3 回 , 下降系列 3 回の測定した平均値を視作業前後で比較した . 結果を図 4.23 に示す . 視作業前後のレベルはほぼ一定で個人差の方が大きく , 本実験で行うような視作業の眼疲労を測定することは困難であると考えられた .

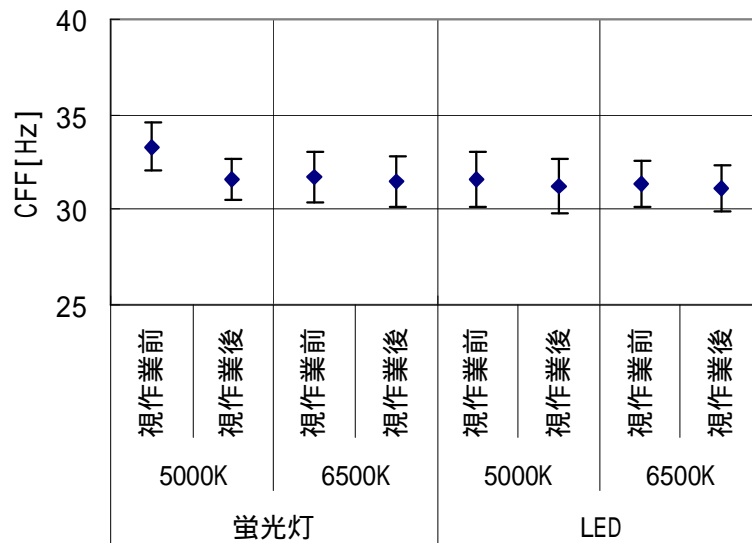


図 4.23 視作業前後の CFF 平均値

2.7.4 コントラスト感度

視作業前後のコントラスト感度をチャートで測定した . もともとのコントラスト感度が個人によって異なるため , クラスタ分析で分けた , 感度の高い人数の多いグループと感度の低い人数の少ないグループごとに平均値を求めた . クラスタ分析の結果を図 4.24 に , 照明条件に対する被験者グループ毎の平均値を図 4.25 ~ 図 4.28 に示す . その結果 , 視作業による低下はほとんどなく , 本実験の視作業による眼疲労にはコントラスト感度に影響を与えないことが確認された .

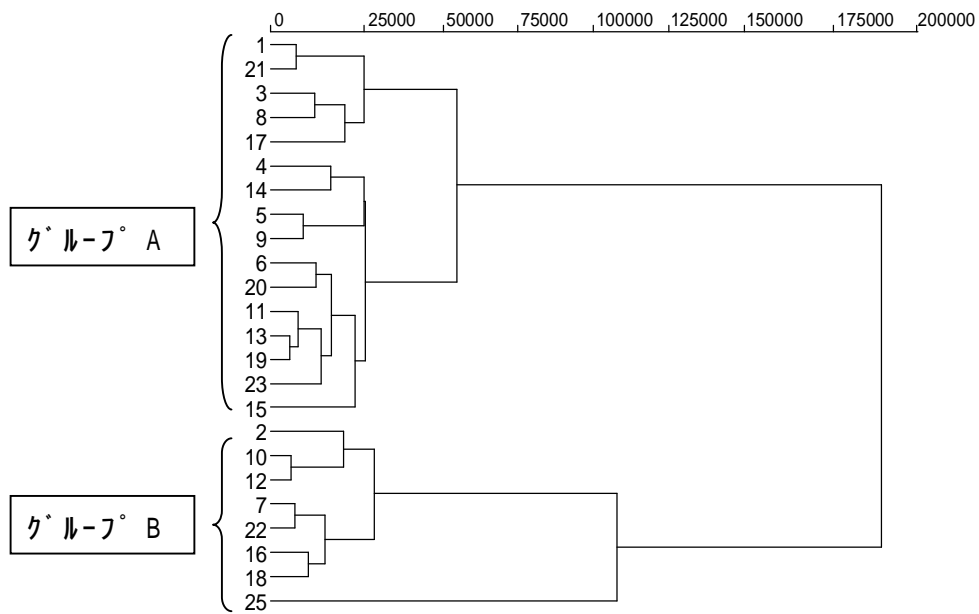


図 4.24 コントラスト感度測定値による被験者のクラスタ分析結果

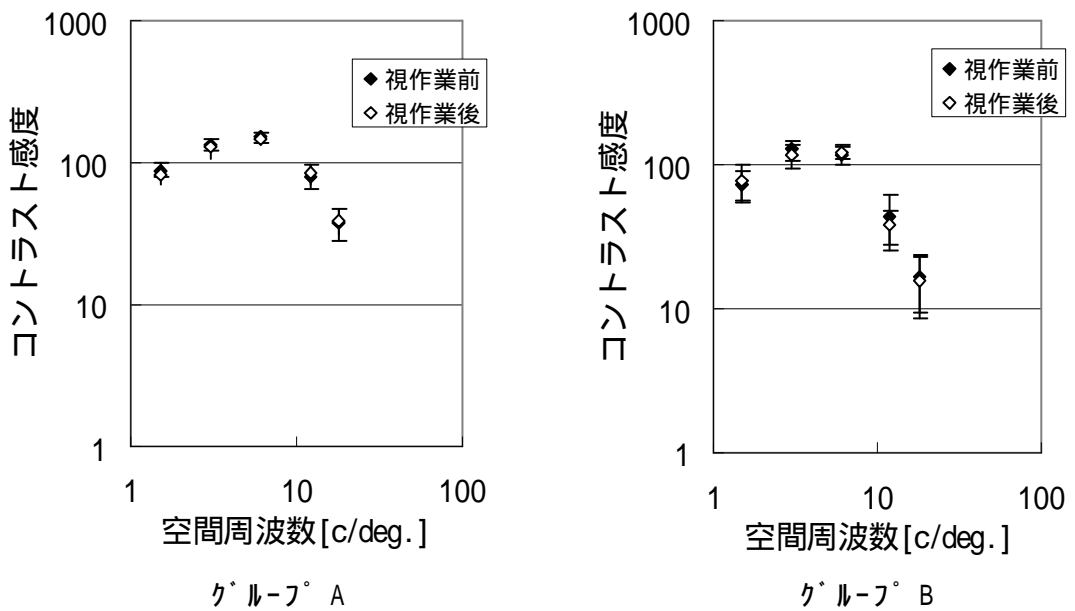


図 4.25 5000K 蛍光灯下での視作業前後のコントラスト感度

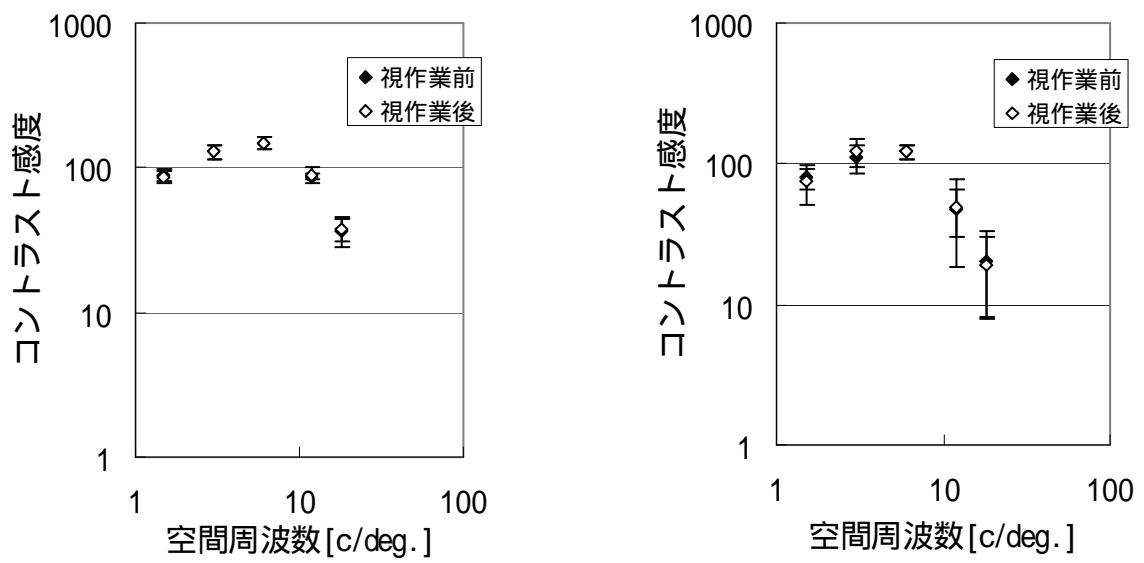


図 4.26 6500K 蛍光灯下での視作業前後のコントラスト感度

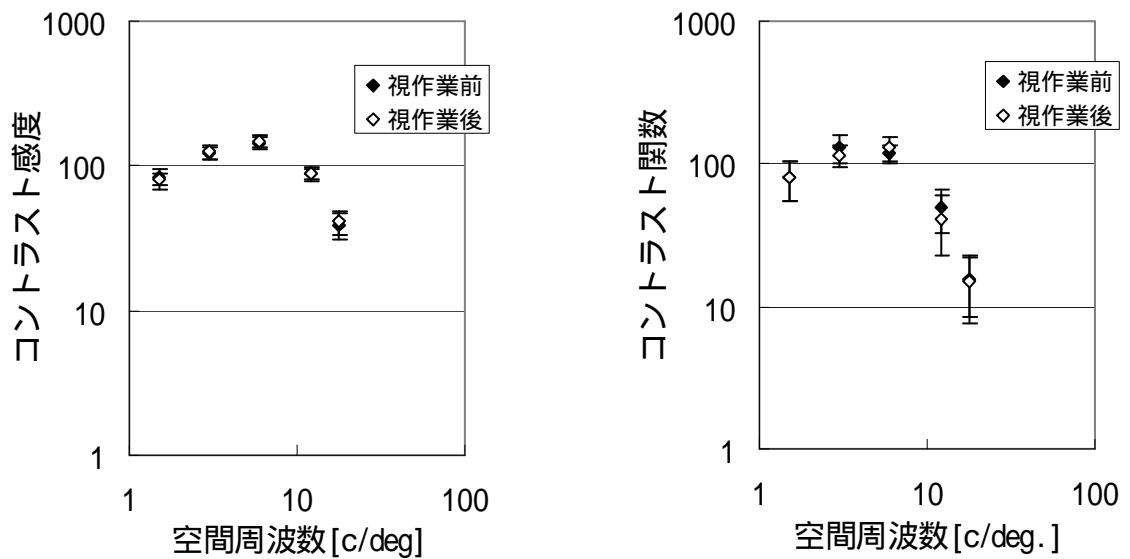


図 4.27 5000K LED 下での視作業前後のコントラスト感度

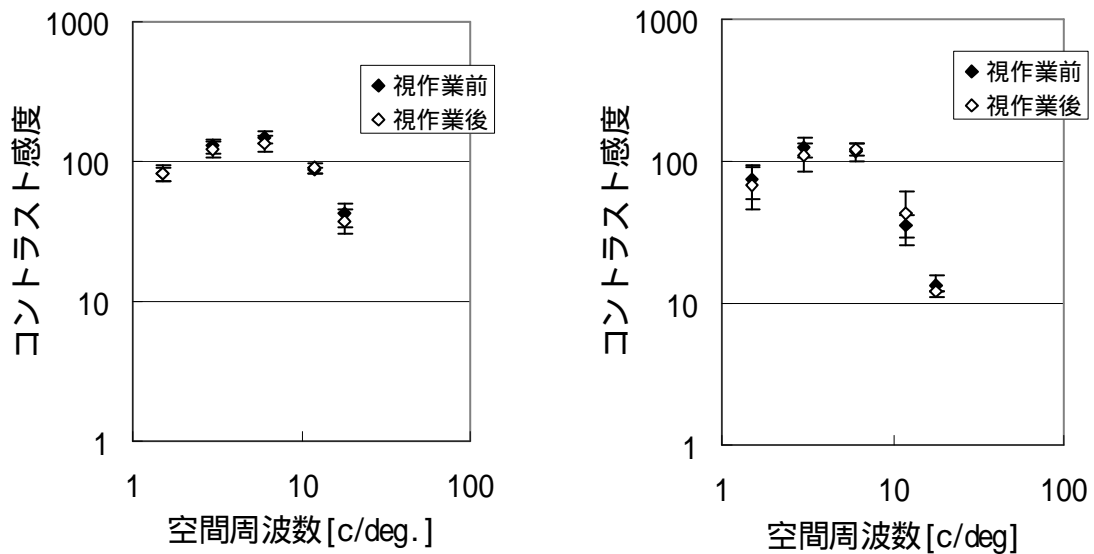


図 4.28 6500K L E D 下での視作業前後のコントラスト感度

4.3.2.7.4 疲労感アンケート結果

疲労感のアンケートは日本産業衛生学会 産業疲労研究会自覚症状調べのうち、眼の疲労に関する第5群の項目により行った。疲労感アンケートの項目は以下の6つである。

- 1) 目が疲れた
- 2) 視力が低下した
- 3) 目が乾いた
- 4) 目が痛くなった
- 5) ぼやけて見える感じがする
- 6) 目がしょぼつく

方法は全ての項目について視作業前と比較して「変わらない」「やや感じる」「とても感じる」の3段階で評価を行う。全項目の平均値で疲労感を判断する。

全被験者の評価の平均の結果を図4.29に示す。全ての条件において視作業後にやや疲れたと申告していたことから、この課題は全ての照明条件で疲労

を与えていることは確認できたが、各条件での有意差は見られず、眼疲労の違いは自覚症状でみることはできなかった。

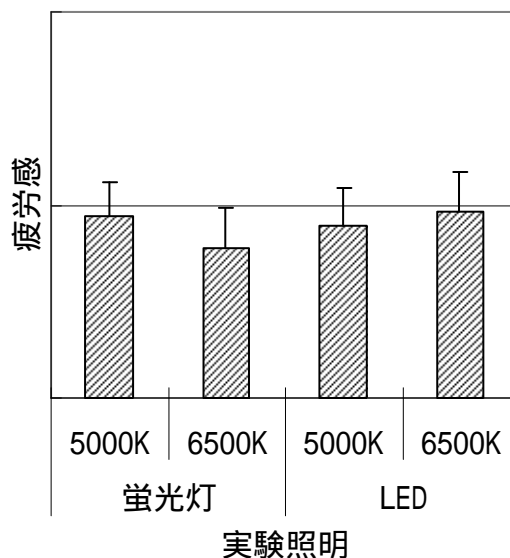


図 4.29 視作業後の疲労感 (エラーバーは 95% 信頼区間)

4.3.3 照明の分光分布による眼疲労の違い

4.3.2 項において紙上の視作業による視機能変化は焦点調節力の低下に現れることを確認した。ここでは焦点調節に対する照明光の分光分布による影響を明確にすることを目的とし、以下の実験を行った。

4.3.3.1 実験照明

人間の眼は最も感度が高い 550nm 付近に焦点を合わせるようになっており、そこから離れるほど焦点の調節を必要とする⁶²⁾。また、単色光に対する焦点調節よりも白色光に対する焦点調節の方が正確であることが報告されている⁶³⁾。そこで中波長域の波長幅に着目し、3 波長域発光形の蛍光灯と一般照明用蛍光灯、及び青色 LED+黄色蛍光体による白色 LED と青色 LED+赤・緑蛍光体による白色 LED を照明光とし、視作業前後の調整力変化を比較した。使用した照明の仕様を表 4.6 に示す。4.3.2 での検討で 6500K(昼光色)の方が調整力低下の傾向が大きかったため、ここでは相関色温度をできるだけ揃え、全て昼光色に統一して実験を行った。各照明は視作業環境としては比較的厳しい照度レベルである机上面照度 300 [lx] に明るさを統一した。

表 4.6 実験に仕様した照明の特性

照明	色温度	Ra	分光分布
3 波長域発光形 蛍光灯	6900K	84	
一般照明用 蛍光灯	6300K	74	
青色 LED + 黄蛍光体による 白色 LED	6900K	70	
青色 LED + 赤, 緑蛍光体による 白色 LED	6200K	85	

4.3.3.2 実験環境

窓の無い外光が入らない部屋に照明を設置し，机上面照度が同じとなるように机を設置した．パーティションで区切られた位置にアコモドポリレコーダーを設置した．

4.3.3.3 被験者

被験者は 19 歳から 22 歳の大学生 32 名（男性 13 名，女性 19 名）である．蛍光灯に対する実験にはそのうち 28 名が参加した．LED に対する実験では 30 名が実験に参加した．被験者の視矯正は通常授業を受ける際と同じとした．半数以上の被験者が矯正を行っており，全員 0.7 以上の視力を有していた．

4.3.3.4 実験手順

被験者は入室後アコモドポリレコーダーにて近点距離と遠点距離を測定し，4.3.2.4 と同様のコピー用紙に黒で印刷された点つなぎによる視作業を 60 分間行った．使用したコピー用紙の分光反射率を図 4.30 に示す．

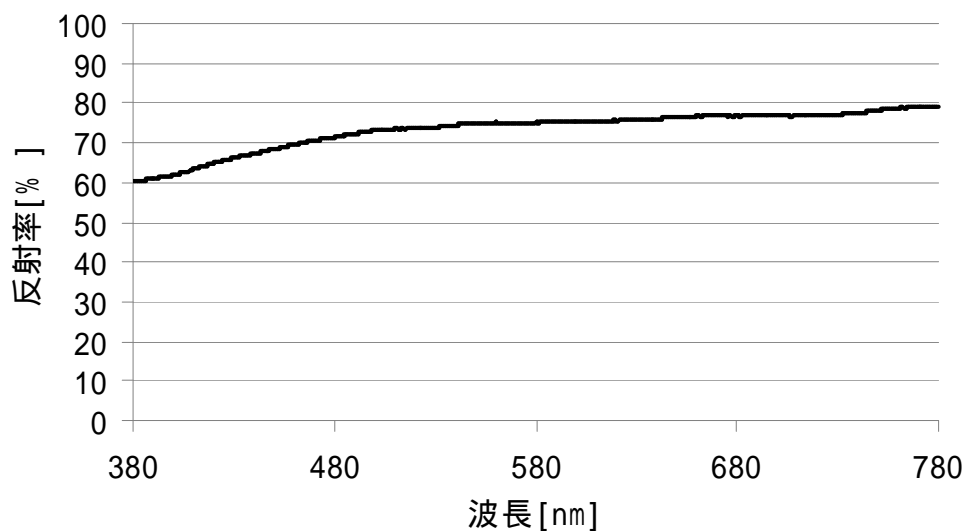


図 4.30 実験に使用した紙の分光反射率

視作業後すみやかに近点距離と遠点距離を測定した。その後、疲労感と視作業中の環境についてのアンケートに答えた。疲労感のアンケート内容は4.3.2.7.4と同じである。

異なる照明条件での実験は前条件の1週間以上後に行い、前条件の眼疲労が影響しないようにした。また、視作業中の照明による見え方についてアンケートを行った。以下の3項目で「わからない」を中心とした「とても」、「やや」の両極2段階ずつの5段階評価で視作業時にどう感じたかを回答した。

- 1)見えにくかった 見やすかった
- 2)暗かった 明るかった
- 3)集中できなかつた 集中できた

4.3.3.5 結果

それぞれの照明条件毎に測定した近点距離と遠点距離から式1にしたがって調節力を求めた。蛍光灯28名，LED30名の平均値を図4.31に示す。

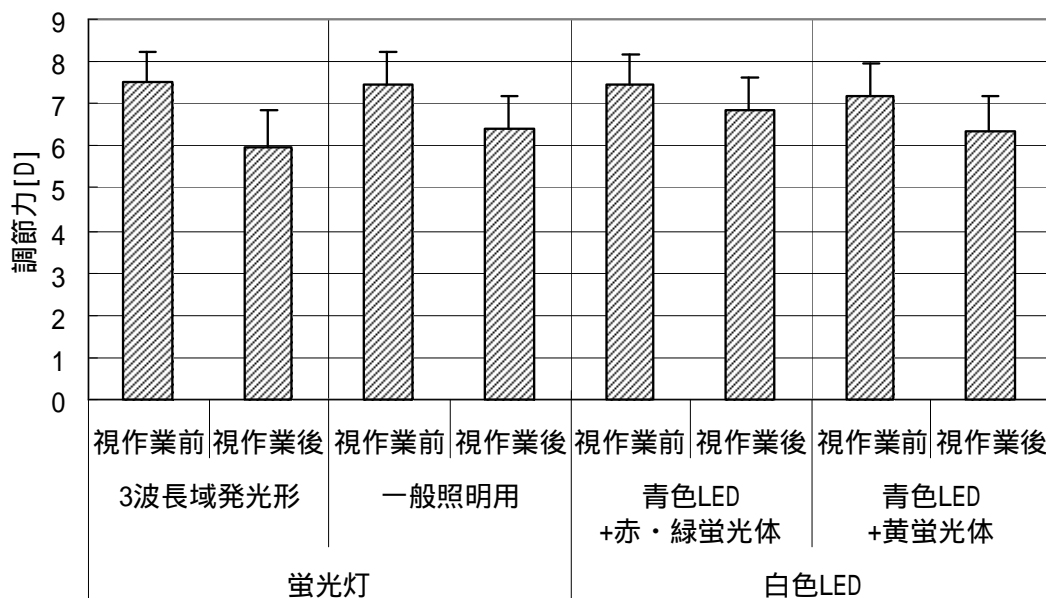


図 4.31 視作業前後の調節力

全ての照明条件で視作業後に調節力は有意に低下した (t 検定で $p < 0.01$)。視作業前の調節力はおよそ 7~7.5D であり，視作業後の調節力は 6~7D であった。蛍光灯の方が調節力の低下が大きい傾向が見られ，3 波長域発光形蛍光灯では 6D 程度まで調節力が低下した。視作業による調節力の低下率を照明条件により比較した結果を図 4.32 に示す。同じ照度，同じ昼光色でも分光分布によって調節力の低下度合いは異なり，蛍光灯の場合 1 時間の視作業で，一般照明用蛍光灯は 15% 程度の低下であったが，3 波長域発光形蛍光灯では 22% 程度の低下が見られた。その差は t 検定の結果危険率 5% で有意であった。LED は 10% 程度の低下であり，有意差は見られなかったが青色 LED+黄蛍光体タイプの方が低下が大きい傾向が見られた。紙上の視作業による眼疲労に対しては，照明の分光分布の影響が大きいことが示された。

Aggarwala らは相対分光分布に標準比視感度 $V(\lambda)$ を乗じた分布を実効スペクトルとしてそのバンド幅が広い光の方が焦点調節能力が高いことを示している⁶⁴⁾。そこで，本実験での作業条件における実効スペクトルと調整力低下の結果を比較した。本実験に使用した照明の分光分布に紙の分光反射率及び $V(\lambda)$ を乗じ，実効スペクトルとして求めた結果を図 4.33 に示す。実効スペクトルのバンド幅は 3 波長域発光形蛍光灯が最も狭く，LED は広い。狭い照明ほど図 4.31 に示した調節力の低下が大きい結果となっており，Aggarwala らの結果と同様の傾向を示した。また，視作業後の疲労感のアンケート結果を図 4.33 に示す。アンケート結果は 3 波長域発光形蛍光灯において視作業後の疲労感がやや 3 波長域発光形蛍光灯が大きい結果となり，図 4.31 の調節力低下率の結果と一致している。

視作業中の照明環境についてのアンケート結果はすべての照明条件で差が無く，見やすさや明るさ感については「わからない」との回答，集中できたかについては「わからない」と「やや集中できた」の間の回答であった。照明の種類による相違が見られなかったことと，照明環境に対して特に感じる事が無かったことから，本研究で採用した 4 種類の異なる分光分布の照明下では，見え方や視作業性に違いを感じてはいなくても，視作業によって生じる眼疲労は異なることを示唆している。

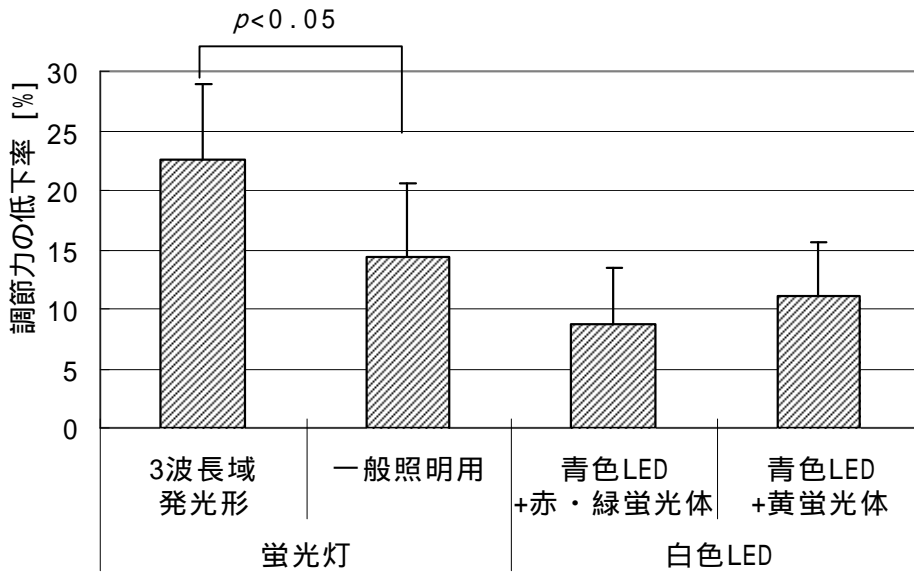


図 4.32 各照明下での視作業による調節力の低下率

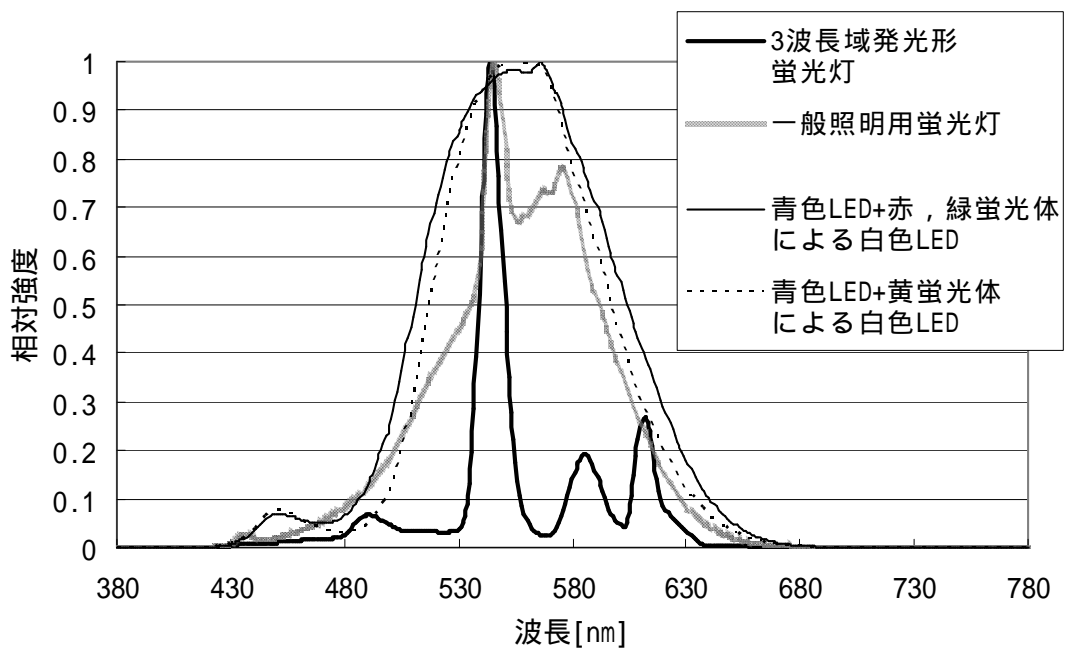


図 4.33 視覚系輝度チャンネルでの実効スペクトル

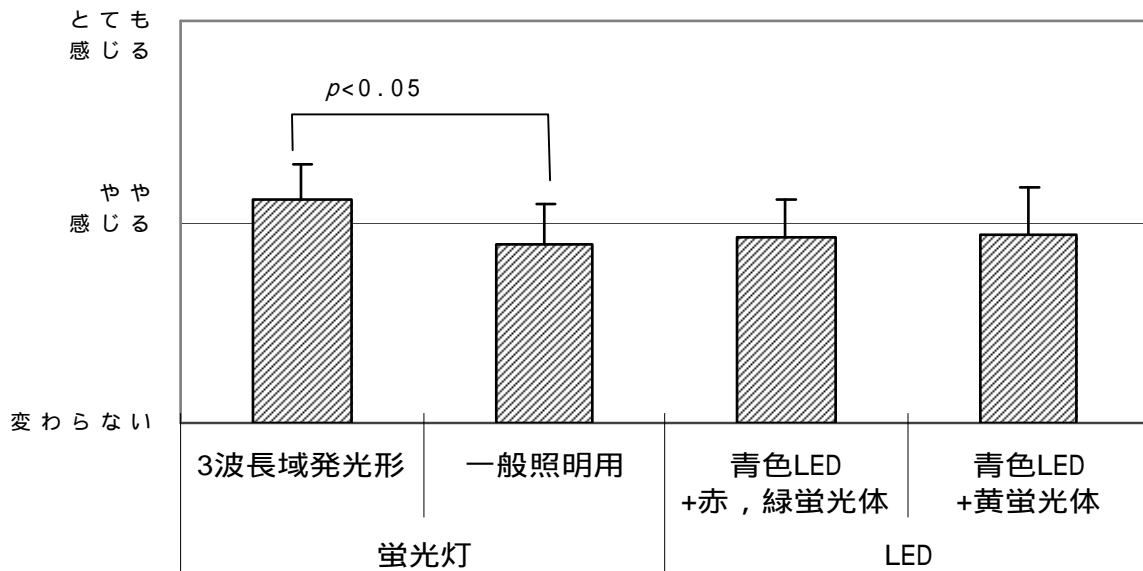


図 4.34 視作業後の疲労感アンケート結果

4.3.4 バンド幅との関係

Aggarwala らは、彼らの研究で用いた照明光の実効スペクトル分布がほぼ対称な一峰性であるため、ピーク値の $1/e$ 強度の波長幅を刺激光のバンド幅として用いた。彼らの結果では、 $1/e$ 強度幅が大きいほど焦点調節能力が高くなっており、これは目に入る光の軸上色収差が大きい方が調節を一定に保つのに適しているからではないかと述べている⁶³⁾⁶⁴⁾。バンド幅というと一般的には半値幅を指すが、Aggarwala らの研究でのように $1/e$ 強度幅や $1/e^2$ 幅が用いられることもある。本研究で用いた蛍光灯の実効スペクトルは図 4.32 に示したように複雑な形状で、相対強度 0.5 以下の部分にもピークが見られ、視機能への寄与が考えられる。そのため 2 章と 3 章で実験に用いた合計 8 種の照明の分光分布と紙の反射率から求めた実効スペクトルに対し、相対強度 0.5 以上(半値幅)と 0.3 以上のバンド幅を求め、実験で得られた調節力低下率との相関を求めた。結果を図 4.35 に示す。バンド幅が広くなるほど調節力低下が少なくなる傾向が認められるが、(b)の実効スペクトルの相対強度 0.3 以上のバンド幅を横軸にとった方に相関が見られた。これは、1) 軸上色収差の大きさが調節維持の一助であるという Aggarwala らの考えを支持し、2)

相対強度 0.3 程度でも調節力維持への寄与があることを示唆する結果といえる。

焦点を合わせやすい波長は個人の視力矯正状態や眼の筋力によってずれはあるものの、通常は視感度のピークである 555nm 近辺と言われている⁶⁵⁾。本研究で行ったような比較的近点での視作業では、眼は屈折を大きくする調節を行うため、通常状態よりも焦点が合いやすい波長は 555nm よりも長波長側にずれると考えられ、バンド幅の広い光の方が個人差と屈折を大きくする影響を受けても無理なく焦点を合わせられると考えられる。そのため、555nm を中心としたバンド幅が広い分光分布を持つ照明ほど眼疲労を起こしにくいと考えられる。

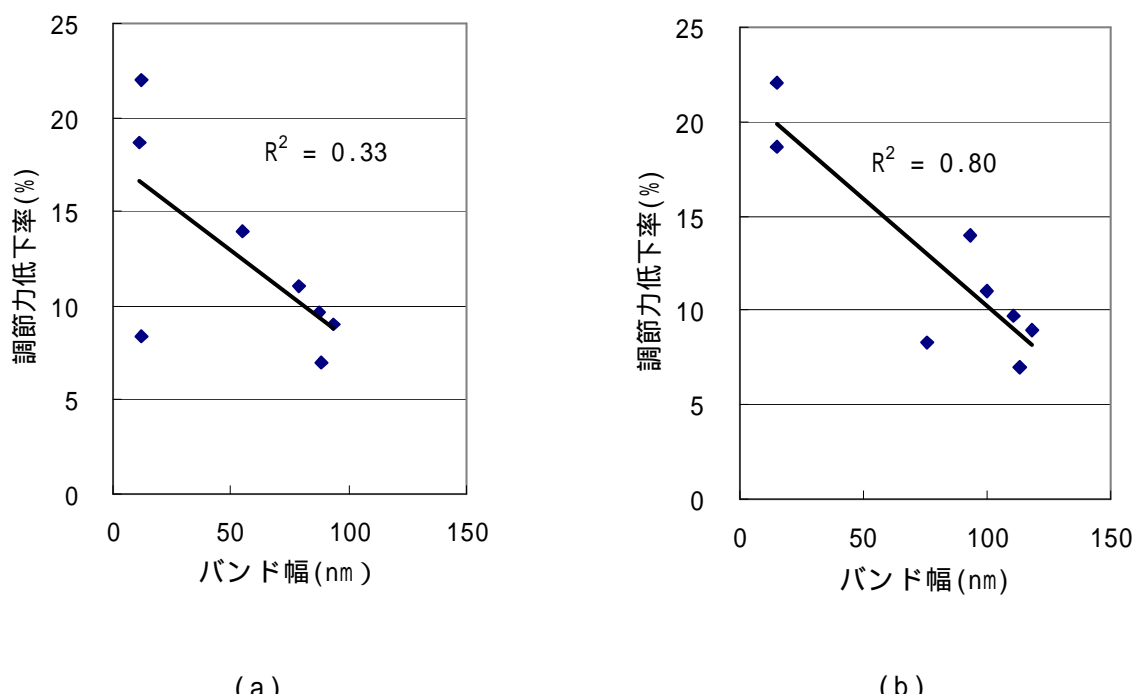


図 4.35 実効スペクトルの相対強度 0.5(a) 及び 0.3(b)でのバンド幅に対する調節力の低下率

4.3.5 おわりに

本研究においては比較的個人差の影響が少ない眼疲労の測定方法として眼の調節力計測を提案した。中村らによって VDT 視作業における眼精疲労の調査結果が行われている⁶⁶⁾。眼疲労が一時的で休息により回復する疲労であるのに対し、日本眼科学会の定義によると眼精疲労は休息によっても十分に回復しえない病的な状態を言い、調査結果によれば眼精疲労のうち、43%が調節性眼精疲労、18.5%が筋性眼精疲労であることが示されている。このことから、調節能力の低下に現れる疲労は眼精疲労の原因になりうると考えられる。紙面でも VDT でも集中した視作業遂行で焦点が合いにくくなったら目を休め、眼筋の疲労を回復することが必要である。本研究の結果は、同じ色温度や照度においても照明の分光分布、特に中波長領域を中心とする相対強度比 0.3 以上のバンド幅が調節力変化に影響を与えることを示した。本研究での疲労感調査や既往研究の結果⁵²⁾⁵³⁾⁵⁸⁾⁶⁰⁾⁶¹⁾から、この調節力変化は眼疲労の度合いを反映していると言えるであろう。本研究では実効スペクトルのバンド幅の相対強度比 0.3 以上が影響を表すのに有効であったが、この値が一般的に適用できるかについては、調節力維持に有効な最小のバンド幅や照度（VDT なら輝度）レベルによる影響の有無等さらなる検討が必要である。多くの知見を積み上げることにより、様々な光源や VDT について分光分布及び、照度又は輝度から眼疲労の程度が予測できる可能性がある。また本研究で採用した照明下では、見やすさや明るさ、集中できるかについての違いを感じなくても眼の調節機能の低下度合いに違いが現れた。すなわち、実際の照明設置の場面で上記の判定に問題が無くても、眼疲労には影響があることも考えられる。より快適な照明環境の実現のために本研究結果を役立てて行きたいと考える。

4.4 本章のまとめ

4 章では生理的な影響として快適性と眼の疲労について取り上げた。快適性については、照明の明るさと相関色温度の組み合わせにより、空間の快適性が異なることは経験的にも明らかであり、すでに白熱灯や蛍光灯による既往研究もあるが、LED は調光調色が容易に行える利便性から、既に自由に調整できる器具が発売されており、快適環境を得るためにも LED における

快適な範囲の明確化の必要性が高いことから取り上げた。その結果、シチュエーションによってその快適範囲が異なることが明確になり、店舗使用を想定した快適範囲を例示することができた。使われ方を加味した設定の必要性を示した。

また、眼の疲労について蛍光灯とLEDを比較し、照明仕様との関連性を検討した。その結果、眼疲労の一つの指標である、焦点調節力の低下が分光分布の影響を受けることが考察できた。分光分布の幅の広さと焦点調節の低下度合いに関連性が見られ、LEDの分光設計によって、より疲労の小さい照明環境を実現できる可能性を示した。

このことは自覚できる心理的快適性については、照明の色温度で影響を考慮することができるが、生理的影響は色温度が同じであっても、自覚症状がないままに影響を与えてしまうことを示している。より良い照明環境づくりにはこのような知見を広く設計者に与え、実現していくことが重要であると考えられる。

5 総合的考察

5 総合的考察

温暖化防止と東日本大震災後の国内外のエネルギー問題から，省エネ，高効率照明への切り替えが進んでいる．その中でLEDは普及が進んでおり，技術的にも一般照明を満足する効率を確保できるようになってからは急激に一般家庭やオフィスなどに適用されるようになってきている．

LEDは既存照明と大きく配光や分光分布が異なり，その特性が人間に与える影響があるのかについては比較的新しい光源であるため，明確になっていないことも多い．特に生活において照明環境は非常に重要であり，照明が視覚に与える影響は大きい．本研究はLEDを一般照明に適用する際に人間の視覚に与える影響について，既存照明と比較しながら，その特徴との関連性を明確にすることに取り組んだ．

特に人間の視覚は年齢によって大きく変化する．加齢による視機能の低下は照明の使用から受ける影響にも違いを与えることが予想される．本論文における一連の研究の中のいくつかのものは実際に高齢者の協力のもと，実験を行い，照明の仕様による影響が加齢によってどう変化するののかについて検討を行った．

LEDは蛍光体のブレンドなどである程度の分光設計の自由度があり，分光分布の最適化が図れる．また，照明器具としても調色や調光が自由にできるという特徴がある．その特徴を活かして，より最適な照明環境を作ることが目的として，研究に取り組んだ．

第2章においては生活シーンでよく見られる，文字を読んだり，対象物を探したりといった行為に対し，適した照明環境を探った．特に加齢によって色温度の影響が大きいことが示された．加齢による眼の感度の低下が，短波長側や長波長側の方が相対的に低下していることが原因の一つと考えられるが，実際に高齢者がどのように見えているのかについてはさらに研究が必要である．さらに計測器はすべて，若齢者相当の標準観測者のデータを基準としており，輝度や照度についても見た目のとの一致性が若齢者と同じとは言えないため，設計上注意する必要がある．

第3章において取り上げた対象物の見え方についても，照明条件によって非常に大きく影響を受けることがわかった．照明下での物の見え方については店舗に加え，一般家庭でも重要である．特に食事は日常的に繰り返される

生活シーンであるため、美味しそうに見えるかについては重要と考慮して取り組んだ。分光分布の微妙な違いによる見え方の違いを人間が認識することが明確になり、よりLEDの分光設計で最適な環境を得ることができる可能性を示した。

第4章においては、照明の心理的、生理的快適性について取り上げた。店舗においては購買意欲や来客数に直接影響すると考えられることから、照明デザインは盛んに行われているが、色温度や分光分布などでその空間の快適性がどのような影響を与えるのかが明確でない。このような状況を踏まえ、本研究ではまず色温度と照度の組合せによる快適性について取り上げた。

色温度と照度の組合せは古くから研究されており、LEDにおいてもほぼ快適な範囲は一致することを検証したが、使われ方によって最適範囲がずれていることを示した。この結果によってより快適な照明環境を作るための指標の一部となると考えられる。

さらに生理的影響として眼疲労を取り上げた。学校やオフィスなどでは一日のほとんどの時間を同じ照明条件で過ごすことが多く、一定の照明条件の中で視作業を多くこなす必要がある。特に眼の疲れは慢性化も懸念され、安全の観点からも照明条件による影響を明確にする必要性は高い。本研究では眼疲労の中で最も症状として多く現れる焦点調節能力の低下に対し、照明の分光分布が影響することを見いだした。自然の光は幅広い分光分布を持っており、どのような焦点調節をしても、一定の光が入ってくることから負担が小さいと考えられるが、蛍光灯やLEDなどの分光分布に偏りがある照明は焦点による収差の影響と入射してくる光の量のバランスから焦点調節時に負担が大きい可能性があることを示した。色温度条件が同じであっても分光分布によって影響があるということは自覚症状がないまま影響を受けてしまうことを示している。設計者にこのような知見を広く示すことが重要と考えている。

本論文においてはより快適な照明環境を作り出すために様々なシチュエーションに応じた最適な仕様を検討した。LEDの特徴を活かした設計のための基礎的研究として、今後の最適な照明環境を作り出す手助けになると考えている。

6 総括

6 総括

本論文で明らかにした主な知見について述べる。

本論文ではLEDを生活環境の照明に適用するにあたり、照度管理だけでなく、光の色や分光分布などを適した仕様に設計することにより、最適な環境に近づけることができることを様々なシチュエーションで明らかにすることができた。

一般住宅やオフィス，工場などにおける視認性について

色温度の最適設定が重要であり，特に高齢者に対しては効果が大きいことがわかった．高齢者の眼の分光感度低下が原因と考えられる．

高齢者には可読性や弁別性には高色温度条件が望ましく，色の目立ちには高色温度条件では照度上昇が必要となる．

対象物の見えについて

LEDの分光設計によってより見えを良くすることができることがわかった．LED光源そのものの設計によってよりよい環境を作り出すことができる．昼白色高演色タイプLEDにおいて470nm，550～600nm付近の強度の調節が効果的であった．

心理的・生理的快適性について

心理的快適性はシチュエーションの違い（その時の心理状態）で影響を受ける．生理的快適性（眼疲労）は見た目の照明条件（照度や色温度）が同じであっても，分光分布によって影響を受ける．

眼疲労しにくい照明条件として550nmを中心とした分光範囲の幅が広い方が望ましい．

今後の課題について

生活行為は多岐にわたっており，また時代によって生活スタイルは変化していく．今回実験できなかったシチュエーションはまだ多く存在し，今後も研究対象として取り組んでいく必要がある．その一方，製品仕様として個々の最適仕様に対応することは事業的には困難を伴い，一般性のある仕様に対

する研究も並行して行うことが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 村上幸, 秋月有紀, 井上容子 : 読み易さ・明るさ感への照明の色温度の影響, 平成 10 年度建築学会近畿支部研究報告集(1998).
- 2) 中山和美, 佐藤仁人: 光源の種類が視対象の見やすさに及ぼす影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集,(2004) pp351-352.
- 3) A. A. Kruihof: Tubular Luminescence Lamps for General Illumination, Philips Technical Review, vol.6 No.3, (1941) pp.65-96.
- 4) 戸田直宏: サーカディアンリズムへの光の影響, 照明学会誌, 第 91 巻, 第 10 号,(2007).
- 5) PR Boyce, Y Akashi, CM Hunter, JD Bullough: The impact of spectral power distribution on the performance of an achromatic visual task, Light Res. Technol. 35,2(2003)pp.141-161.
- 6) 岡嶋克典: 視覚の加齢変化, 基礎と応用, 照明学会誌, 94-3,(2010) pp171-175.
- 7) 田谷勝夫, 清水亜也: 高次脳機能障害者の注意機能検査の開発 - パソコン版 空間性注意検査・軽度注意検査マニュアル -, 職リハネットワーク, 57(2005).
- 8) 大森正子, 中野博史, 宮尾克: 立体視における色彩の進出・後退効果の加齢変化について, 日本色彩学会誌 vol.28, SUPPLEMENT, (2004)pp96-97.
- 9) 照明学会: 生活環境における視認性評価の概念と課題(照明学会「視認性に関する研究調査委員会」報告,(2002)pp44-47.
- 10) 厚生労働省医薬品食品局長: 薬事法の一部を改正する法律について, 薬食発第 0614006 号, 平成 18 年 6 月 14 日.
- 11) 中根芳一: 印刷文字の見易さ及び適正照度に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 229,(1975) pp.111-220.
- 12) 下村, 芦澤, 佐川: 色文字の読みやすさに及ぼす照度レベルの影響, 日本女子大大学院紀要 家政学研究科・人間生活学研究科, 16,(2010) pp.19-26.
- 13) 岩井彌, 岡嶋克典: 正対比文字で構成された文章に対する読みやすさ評価関数, 照学誌, 88-11, (2004) pp.874-881.
- 14) Ayama, Ujike, Iwai, Funakawa, and Okajima: Effects of contrast and

- character size upon legibility of Japanese text stimuli presented on visual display terminal, *Optical Review*, 14-1, (2007) pp.48-56.
- 15) 長谷川敬：低コントラスト色文字画像の可読性評価，*日本色彩学会誌*，11-3，(1987) pp.213-218.
 - 16) 舟川政美：色コントラストと可読性に関する実験的研究，*照明学会誌*，84-11,(2000)pp.799-808.
 - 17) 原直也，野口太郎：無彩色背景有彩色文書の文字の明度，彩度，色相が読みやすさと等価輝度対比に及ぼす影響，*照明学会誌*，88-11，(2004)pp.866-873.
 - 18) 小谷朋子：LEDのあかり～照明ソフトの観点から，*照明学会誌*，94-6,(2010) pp.342-344.
 - 19) 岡嶋克典，岩田三千子：水晶体加齢モデルによる高齢者の照明シミュレーションと最適照度の検討，*照学誌*，82-8A，(1998) pp.564-572.
 - 20) JIS S0031 高齢者・障害者配慮設計指針 - 視覚表示物 - 年代別相対輝度の求め方及び光の評価方法(2004) .
 - 21) 高橋康朗，佐川賢，岩澤洋：年代別の分光視感効率関数，*照明学会全国大会*，(1999)pp.95.
 - 22) マイボイスコム 株式会社：カゼ薬の利用に関するアンケート調査（第2回）(2010) .
 - 23) 内山俊朗，永野行記，篠原裕一，登坂秀規，高橋宏祐：Web アクセシビリティ診断ツールの開発，*デザイン学研究作品集 11*，pp.28-31 (2006).
 - 24) Ahnelt, Kolb and Pflug: Identification of a subtype of cone photoreceptor, likely to be blue sensitive, in the human retina, *Journal of Comparative Neurology*, 255,(1987) pp.18-34.
 - 25) 中村肇，岩田三千子：化粧用ミラーライトの光源選定に関する心理評価実験，*照明学会誌*，93-2 (2009)pp71-76.
 - 26) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック第3版，東京大学，(2011) pp549-550.
 - 27) 小谷朋子：LEDのあかり～照明ソフトの観点から，*照明学会誌*，94-6(2010) 342 - 344.
 - 28) 小林信治，小松原仁，淵田隆義，橋本健次郎：相対評価によるLED光

- 源の演色性評価，照明学会全国大会講演論文集，44(2011)pp211.
- 29) 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，照明学会誌，74-10(1990)pp674-680.
- 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」，照明学会誌，84-11(2000)pp843-850.
- 31) 社団法人自動車技術会：2009年度乗用車市場動向調査，(2010)pp18
- 32) 溝上陽子：白色 LED 光源下における色の見え，日本色彩学会全国大会講演要旨集，(2012) pp10-11.
- 33) JISZ8730 色の表示方法 - 物体色の色差(2009).
- 34) CIE Publication No.159 A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02(2004).
- 35)新版 色彩科学ハンドブック第3版，日本色彩学会編(2011)pp96-97.
- 36)山口サヤカ，斎藤孝：日本人の肌の色を好ましく見せる LED 照明光の開発，日本色彩学会全国大会要旨集，(2012) pp30-31.
- 37) 福田由美，三石巖，布上真也：高効率と高演色性をともに実現できる白色 LED 用緑色サイアロン蛍光体，東芝レビュー，vol.64，4(2009).
- 38)矢野正，橋本健次郎：肌色の好ましさの評価技術，Matsushita Technical Journal Vol.47, No.4 Aug.(2001)pp348-353.
- 39) 小谷朋子：色の見え方を考慮した LED 照明の分光分布，東芝レビュー，vol.65 No,4, (2010) pp60-63.
- 40) 山口 サヤカ，斎藤 孝，岩井 彌：肌の色を好ましく見せる LED 光源の波長特性，Panasonic Technical Journal, vol.58 No.2(2012).
- 41) JIS Z8726 光源の演色性評価方法(1990).
- 42) HASHIMOTO, K: New Method for Specifying Color-Rendering Properties of Light Sources Based on Feeling of Contrast., COLOR research and application, 32, 5, (2007)pp361-371.
- 43) 草間豊子，安部英幸，河野澄夫，岩元睦夫：近赤外スペクトルの主成分分析および主成分スコアを用いた判別分析による老化大豆実の識別，日本食品科学工学会誌，vol.44 No.8(1997).
- 44) 松下進：よくわかる最新照明の基本と仕組み，株式会社秀和システム

(2008).

- 45) 松島公嗣：光源の特徴と使い分け，電気設備学会誌 15(1),(1995) pp.11-21.
- 46) JIS Z9110 照明基準総則，(2010) pp.14-17.
- 47) 中村肇：Kruithof のカーブは正しいか？，照学誌，85-9,(2001) pp.793-795.
- 48) H. W. Bordmann: Quality of Interior Lighting Based on Luminance, Trans. Illum. Eng. Soc. Vol.32 No.1, (1967) pp.22-40.
- 49) Robert G. Davis and Dolores N. Ginthner: Correlated Color Temperature, Illuminance Level and the Kruithof Curve, Journal of the Illuminating Engineering Society, 19, (1990) pp.27-38.
- 50) 高橋啓介：照明の色温度と照度が室内環境評価に及ぼす影響，医療福祉研究，第2号(2006)。
- 51) 大井尚行，魯斌，高橋浩伸：住居居間における照度・色温度の好ましさに関する蛍光ランプとLEDの比較模型実験，日本建築学会環境系論文集，74-638，(2009) pp.421-426.
- 52) 望月悦子，木村洋：分光分布の違いが視覚疲労に与える影響 - LED と蛍光ランプ下のVDT作業による視覚疲労の比較 - ，日本建築学会環境系論文報告書，第75巻，第647号(2010) pp35-41.
- 53) 小谷朋子，東洋邦：LEDを用いた快適照明空間を実現するための取組み，東芝レビュー，vol.65，7(2010)。
- 54) 江欣宸，李東起，高秉佑，古賀誉章，平手小太郎，宗方淳，吉澤望：作業空間におけるLED照明の光色による心理的・生理的影響に関する研究，日本建築学会環境系論文報告書，第75巻，第645号(2010) pp683-690.
- 55) 岡本洋輔，小岩弘子，野口公喜：瞳孔径測定による眼疲労評価に関する検討～光環境の明るさの違いが眼疲労に与える影響～，照明学会全国大会(2012)。
- 56) 村田厚生，空敬士，若宮由理子，森若誠，永田雅典：LED読書灯による読書時の疲労と見やすさについて - 若年者と高齢者の比較 - ，豊田合成技報，Vol.47，2,(2005) pp 46-51.
- 57) 東洋邦，一條隆，山口秀樹，篠田博之：眼疲労と光源の種類との関係(1)，照明学会全国大会(2008)。
- 58) 齋藤公美恵，上村佐織，小石智子，米村健一：テレビゲームが近点距離，フリッカー値，自覚症状などに及ぼす影響について，熊大教育実践研究，14，(1997) pp19-26.
- 59) 三橋哲夫：CFFの測定・解析法とテレビ観視者の疲労に関する一検討，

- 信学誌 A, vol.J77-A, No.12, (1994) pp1768-1776.
- 60) 植竹篤志, 大塚美保, 高澤要介, 村田厚生: VDT 作業時の視覚疲労の評価に関する研究, 電子情報通信学会誌 A, vol.J83-A, No.12, (2000) pp1521-1529.
- 61) 中浦雅仁, 山口秀樹, 篠田博之: 異なる波長における調節応答時間計測による眼疲労評価, 照明学会全国大会(2011).
- 62) D.I.Flitcroft: A neural and computational model for the chromatic control of accommodation, Visual Neuroscience, 5, (1990) pp547-555.
- 63) Karan R. Aggarwala, Sujata Nowbotsing, and Philip B. Kruger: Accommodation to Monochromatic and White-Light Targets, Investigative Ophthalmology & Visual Science, vol.36, No.13, (1995) pp2695-2705.
- 64) Karan R. Aggarwala, Ekaterina S. Kruger, Steven Mathews, and Philip B. Kruger: Spectral bandwidth and ocular accommodation, J. Opt. Soc. Am. A., vol.12, No.3, (1995) pp450-455.
- 65) LN THIBOS, A BRADLEY, X ZHANG: Effect of ocular chromatic aberration on monocular visual performance, Optometry & Vision Science, vol.68, No.8, (1991) pp599-607.
- 66) 中村晴美, 末廣龍憲, 大石省三, 兎山工, 大本達也, 中尾俊也, 竹本勇, 三島宣彦: 眼精疲労評価方法に関する研究, 日本災害医学会会誌 vol.42, 8, (1994) pp617-620.

本研究に関する発表論文等

【第2章】

学・協会誌等論文

1. (題 目) L E D 照明と蛍光灯下での色文字の可読性
(著者名) 久保千穂 , 山岸未沙子 , 山羽和夫 , 阿山みよし
照明学会誌 , 第 9 7 巻 , 第 5 号 , 2 2 5 頁 ~ 2 6 2 頁
2 0 1 3 年に掲載
2. (題 目) 自動車のルームランプを対象とした L E D 照明下での
色の目立ちと加齢の影響
(著者名) 久保千穂 , 山田智子 , 山羽和夫 , 阿山みよし
日本色彩学会誌 , 第 3 6 巻 , 第 3 号 , 2 2 6 頁 ~ 2 3 2 頁
2 0 1 2 年に掲載

国際会議発表論文

3. (題目) Readability of Colored Text on a Colored Background under LED
Lighting and Fluorescent Lighting
(著者名) Chiho KUBO , Misako YAMAGISHI , Miyoshi AYAMA , and Kazuo YAMABA
(会議名) International Color Association
(資料) CD-ROM
(開催場所) Taipei , Taiwan (開催時期) September 2012

口頭発表

4. (題目) 色温度の異なる LED 照明下での視作業への加齢の影響
(著者) 久保千穂 , 渡邊泰裕 , 山岸未沙子 , 山羽和夫
国際ジェロンテクノロジー学会日本支部研究発表会 2012 , 2012 年 12 月

【第3章】

口頭発表

5. (題目) 主成分分析を利用した見え評価に影響する分光成分の特定
(著者) 久保千穂 , 山羽和夫 , 阿山みよし
照明学会 , 第 4 6 回全国大会 , 2013 年 9 月

【第4章】

学・協会誌等論文

6. (題 目)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

(著者名) 久保千穂，山羽和夫，阿山みよし

照明学会誌，第96巻，第2号，77頁～81頁

2013年に掲載

7. (題 目)照明下での視作業における眼疲労への分光分布の影響

- 蛍光灯とLEDの比較 -

(著者名) 久保千穂，藪田由紀子，山羽和夫，阿山みよし

照明学会誌，第98巻，第2号，79頁～86頁

2014年に掲載

謝 辞

本論文をまとめるにあたり，的確なアドバイスと丁寧なご指導を賜りました指導教官の阿山教授に深く感謝いたします．

また，全体を通じて助言及び実験のサポートなど様々な助力をいただいた，日本福祉大学山羽教授に深く感謝いたします．

実験の場を提供いただき，アドバイスをいただいたトヨタ自動車株式会社 渥美文治様，名古屋大学情報科学研究科宮尾研究室の皆様，愛知県立大学小栗教授および研究室の皆さん，山羽研究室の皆さんに感謝の意を表します．

また，実験装置や実験などで協力いただいた豊田合成株式会社 杉山剛司氏，福井峰夫氏，加藤英明氏，山田智子氏，簗田由紀子氏，渡邊泰裕氏に感謝いたします．

また，実験方法など数々の助言を下さいました金沢工業大学 金谷末子教授（現 株式会社ビジュアル・テクノロジー研究所 取締役社長）に心より感謝致します．

社会人入学にあたっては，在籍している豊田合成株式会社の留学制度により支援いただき，業務と両立しながら研究に従事することができました．温かく支援いただいた，人材企画部安田室長，応援してくださった職場の皆様感謝いたします．最後に3年間支えになってくれた2人の子供たち，朱音と和葉にたくさんのありがとう．

久保 千穂