

白内障視環境下における HSV 色光に対する色覚特性

Properties of Color Vision in HSV Color System Lights in the Cataractous Vision Environment

● 藤田徹也／富山大学芸術文化学部

Tetsuya Fujita / Faculty of Art and Design, University of Toyama

● Key Words: Cataractous vision environment, Cataract experiencing goggle, Video Display Terminal, HSV color system, Color vision threshold method, Brightness matching method

要旨

本研究では、VDT上のHSV色光に対する応答を、白内障再現ゴーグルを装着した場合とそうでない場合についてそれぞれ測定し比較する実験を実施した。その結果、白内障視環境下では全てのHSV色相において被験者応答値の上昇が見られ、特に青系統（210°～270°）における感度低下の度合いが顕著であった。

青色光は刺激純度が高いため、水晶体の混濁による短波長領域での分光透過率の低下をより強く受けると考えられる。また、色覚閾では輝度減少率がゴーグルの分光透過率と比較して小さいことから、水晶体核内の物質による光の反射・散乱の影響が大きいことを示唆する一方、色覚閾上においては、輝度減少率が概ね分光透過率に対応しているため、主として水晶体の黄変化による分光透過率の低下が影響していると考えられる。

白内障視環境下では、黒背景で青系統の表示色を使用する場合、視認性に問題を生じる可能性があることが分かった。その対策として光源となる青色光の輝度の上方補正が有効であると考えられる。また、青系統の代わりに、他の光源色が青色に対して同等以上の割合で含まれるHSV色相領域の色を使用すると感度が向上し、視認性を改善する効果があることが明らかになった。

1. はじめに

水晶体の加齢変化すなわち黄変化・白濁化等を要因とする色覚の劣化は、全ての人に起こり得る老化現象の一つである。その程度が進行し、光の透過が阻止される症状が老人性白内障である。白内障患者の眼球の水晶体の分光透過率は、特に400～500nmの短波長領域で著しく低下することが知られている¹⁾。2005年の厚生労働省患者調査²⁾によると、国内の白内障総患者数は約129万人であり、そのうち65歳以上の患者が114万人となっている。2005年現在の65歳以上の推計人口³⁾は2556万人なので、白内障患者はその4.5%に相当することになる。したがってこのような老化によ

る色覚障害への対応は重要な課題の一つとなっている。

ところで近年、ディスプレイ装置（VDT：Video Display Terminal）が普及し、コンピュータだけではなく、銀行のATMや空港のチェックイン端末等として広く社会で利用されている。VDTのデザインおよびインタフェースについては、JIS X 8341-2⁴⁾やJIS S 0031⁵⁾の制定に見られるように高齢者や障害者等に配慮した配色・画面設計の指針が標準化されつつある。しかし、これらの規格がCIE表色系や波長別分光視感効率に基づくものであるのに対し、実際のコンピュータグラフィクスによる配色では256階調のRGB値や、これと同等のHSV表色系が用いられることが多い。このため、情報端末画面の設計時に高齢者への配慮が十分でないケースも依然として見受けられるのが現状である。

一方、これまでの白内障視環境下における色覚に関連した研究としては、岡嶋ら⁶⁻⁷⁾、池田ら⁸⁻⁹⁾による論文が存在する。岡嶋らは被験者の年齢と水晶体の黄変化の双方を考慮したシミュレーションに基づく色フィルターの眼鏡を若年者に装着して、マンセル色票の見えをカテゴリカルカラーネーミング法を用いて測定した。その結果、定性的にはフィルタ装着によって顕著な色の見えの違いは生じないことが示された。また、池田らは、かすみと色の2種類のフィルターから構成されている白内障再現ゴーグルおよびマンセル色票を用いて、ゴーグルを装着した場合とそうでない場合について、同色に見える色票対および色領域の変化を測定した。実験の結果、ゴーグルを装着した場合に見えの彩度の低下および色領域の減少が観測された。このように、白内障視環境下における物体色の見えや彩度の低下について分析した事例は数例あるが、VDTなどのコンピュータグラフィクスの光源色に対する白内障視環境下における感度低下の詳細について、定量的に言及している文献は見当たらない。

国立社会保障・人口問題研究所のレポート¹⁰⁾によると、全人口に対する65歳以上の高齢者の割合は2006年の約20%から上昇を続け、2020年には約30%、

2050年には約40%に達すると推定されている。このような高齢社会の到来を迎え、情報端末の画面表示における視覚バリアフリーに向けての取り組みのより一層の強化が求められている。本研究では、白内障視環境下において、VDT上の色光、特にコンピュータグラフィクスによって表現されたHSV色光に対する色覚特性を定量的に評価するための基礎的なデータを収集することをその目的とする。

本研究では若年者を被験者として、LCD（Liquid Crystal Display：液晶ディスプレイ）上の中心部に呈示される刺激光に対する応答を、白内障再現ゴーグルを装着した場合とそうでない場合についてそれぞれ測定する実験を実施した。本研究の対象とする実験は二つの輝度領域における実験、すなわち色覚閾値法による色覚閾における実験、および明るさマッチング法による色覚閾上での実験である。色覚閾値法による実験では、テスト刺激光のHSV輝度を減少させ、色覚が消滅した時点での応答を記録する。また、明るさマッチング法による実験では、右側のテスト刺激光のHSV輝度を調節し、左側の白色参照光（輝度 15cd/m^2 ）と明るさが同じと感じられる点での応答を記録する。

実験の結果得られた被験者応答値のデータを分析し、白内障再現ゴーグルの装着による影響について、その全体的な傾向を求め、さらに色相間での比較を行った。また、HSV輝度値データは非線形で機器依存性を持つため、より定量的に評価するために、事前の測光値に基づいてHSV輝度値Vに対応するCIE XYZ表色系の刺激値Y（CIE輝度）を求め、Yを視知覚均等量であるCIE 1976 明度指数 L^* （CIE明度）に換算した。この L^* を用いて、ゴーグル装着時すなわち白内障視環境下における比感度をHSV色相別に計算した。以上の実験結果に基づき、白内障視環境下での青系統のHSV色相領域における感度低下の原因、および白内障の症状を持つ人に対してVDTにより情報表示を行う際の問題点とその対策について考察する。

2. 加齢と視覚

白内障視環境下における色覚特性について検討するためには、老人性白内障の色覚への影響を把握することが不可欠である。本章では水晶体疾患としての白内障について述べ、水晶体黄変化による分光透過率の低下に関するデータを示す。

2.1 老人性白内障

水晶体は瞳孔の後ろに位置し、前房と硝子体との間にある1つのレンズである。物体の像を網膜に結像させる目の屈折系としては角膜の約40D（Dはジオプター

で、焦点距離[m]の逆数）に次いで水晶体は約20Dの屈折力を持っている。さらに、焦点を自動的に合わせる調節という大きな役割を持っている。水晶体中央部の線維は、25歳を過ぎる頃から硬くなり、水晶体核を形成する。この核はその後加齢とともに逐次増大し、硬化していく。

白内障とは水晶体が混濁した状態をいう。その混濁は蛋白の変成、線維の膨化や破壊によるもので、これには先天性と後天性のものがある。後天性の白内障としては、原因別に老人性、外傷性。併発性、放射線性、内分泌代謝異常性、薬物または毒物性などに分けられる。

老人性白内障は、白内障の中で最も多いものである。老人性白内障の病因は加齢による水晶体の混濁で、70～80歳の高齢者になると多少なりともすべての人に認められる。初発年齢には個人差があるが、一般に50歳以上で他に原因を見いだせないものを指す。混濁の程度により進行の順に初発白内障、未熟白内障、成熟白内障、過熟白内障に分けられる（図1参照）。

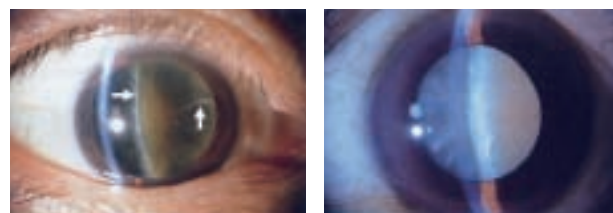


図1 未熟白内障（左）と成熟白内障（右）¹¹⁾

老人性白内障により視機能が傷害され日常生活や職業に支障をきたすようになったら手術治療を行う。手術は水晶体核を超音波振動で破碎しながら吸引する、水晶体超音波乳化吸引法が取られることが多い。水晶体の混濁が弱くても網膜や視神経、視覚中枢、角膜などに異常がある場合には手術後の視力回復が不十分である。混濁の程度と視力が一致しないと考えられる場合は十分な術前検査が必要である。手術後は強度の遠視の状態となるので、眼鏡またはコンタクトレンズによる矯正を行っていたが、最近では眼内レンズの挿入によって視力矯正が行われている。

2.2 水晶体黄変化による分光透過率の低下

白内障による水晶体の弾力性の低下および混濁は高齢者の視覚に影響を及ぼす。水晶体の弾力性低下は、約40歳代前から自覚が始まり、遠くを見ながら手元のものに目を移したとき焦点調節に時間がかかることや、近くのものを見るときに老眼鏡が必要となることで知られている。一方、水晶体核の混濁は色覚への影響が大きい。その主な原因は、変成した蛋白質による光の散乱、および黄変化による分光透過率の低下であ

る¹²⁾。黄変化した水晶体は一種のフィルターとして機能し、光の透過率を全般に減少させるだけでなく、短波長の光の透過率を特に減少させる。このため網膜には青い光が到達しにくくなり、短波長領域の色の弁別能力が低下する。

市川は、2歳と74歳の正常水晶体を無傷で摘出し、房水と等張、等pHの溶液の入ったセル中に固定し、透過光の分光透過率を測定した¹⁾。実験結果の一部を図2に示す。図2の横軸には参照光の波長、縦軸には参照光に対する分光透過率をとっており、2歳と74歳の水晶体の測定値を表している。正常水晶体は若年であっても紫外部をほとんどカットし、加齢とともに400～500nmの短波長光をさらにカットすることが明らかになった。

坂本は、白内障手術によって摘出された水晶体核部の切片を用いて分光透過率を計測した¹³⁾。実験結果の

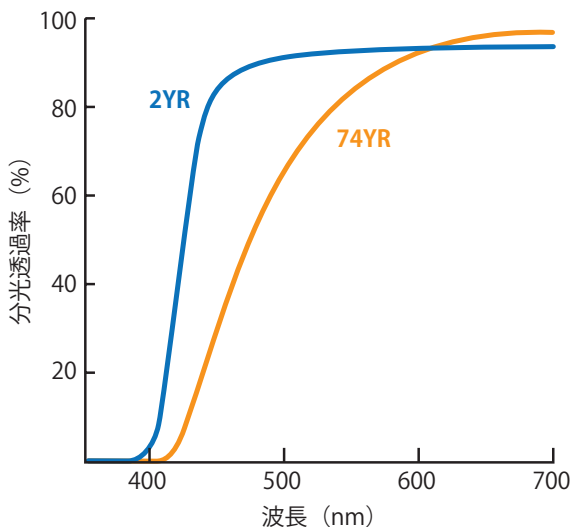


図2 2歳の正常水晶体と74歳の正常水晶体の分光透過率

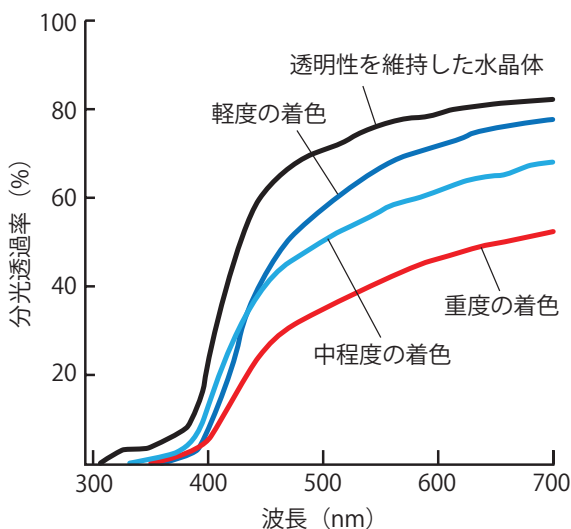


図3 水晶体摘出核の混濁程度別分光透過率

一部を図3に示す。図2と同様に横軸には波長、縦軸には分光透過率をとり、透明性を維持した水晶体および軽度・中度・重度に着色した水晶体核の分光透過率を示している。着色した水晶体は可視光線全域に渡って光の透過性を下げるが、市川の結果と同様、短波長領域で特に分光透過率の低下が顕著であり、白内障の程度が進行するにしたがって強くなる傾向にある。

市川や坂本の実験結果に見られるとおり、黄変化した水晶体は一種のフィルターとして機能し、光の透過率を全般に減少させるだけでなく、短波長の光の透過率を特に減少させる。このため網膜には青い光が到達しにくくなり、短波長領域の色の弁別能力が低下する。ただし、若年者と高齢者が色の見えを主観的に評価する基礎研究の結果からは、池田の実験結果に見られるような彩度の低下は報告されているものの、色相に関しては、加齢の変化に伴う有意な変化(黄変化)が現れるとする報告はない。これは、眼球光学系の加齢による変化と適応による神経系の経年変化とが相互にバランスを取り合い、一種の色恒常性的メカニズムが作用していると考えられる¹⁴⁾。

3. コンピュータグラフィックスの表色系

本研究ではコンピュータグラフィックスで一般的なHSV表色系を使用するため、実験の結果得られたデータを正しく評価するためには、HSV表色系と普遍的な表色値との適切な対応付けが不可欠である。本章では、コンピュータグラフィックスで用いられている表色系と、普遍的な表色系として用いられているCIE表色系との対応について説明する。

3.1 HSV表色系

コンピュータの画面表示に使用されるディスプレイ装置では、通常、各画素は人間の色感覚に対応したR(赤), G(緑), B(青)の三原色の混色として実現されている。あるディスプレイ装置の三原色をxy色度図上にプロットした場合、加法混色の定義より、このディスプレイ装置が表現できる色の範囲すなわち色域は、この三原色を結ぶ三角形の内部となる。多くのディスプレイ装置がR, G, B値をそれぞれ0から255の256階調によって色光を表現している。特にR:G:B=1:1:1の割合で混合させると無彩色を呈し、R=G=B=0の場合は黒色、R=G=B=255の場合は白色にそれぞれ対応している。

HSV表色系はRGB値を変換し、マンセル表色系と同様に色相(H: Hue)、彩度(S: Saturation)、輝度(V: Value)の三つの顕色値で表現したものである。HSV表色系は、1978年にA. R. Smith¹⁵⁾によって提案された。RGB値からHSV顕色値への変換式(円錐モデル)は、

以下の通りである¹⁶⁾。

$$V = \max(R, G, B)$$

$$S = V - X \quad (X = \min(R, G, B))$$

$$H = \begin{cases} \frac{B-R}{G-X} \cdot 60 + 120 & G \text{ が最大のとき} \\ \frac{R-G}{B-X} \cdot 60 + 240 & B \text{ が最大のとき} \\ \frac{G-B}{R-G} \cdot 60 + 360 & R \text{ が最大で } B > G \text{ のとき} \\ \frac{G-B}{R-B} \cdot 60 & R \text{ が最大で } G > B \text{ のとき} \end{cases}$$

ここでR, G, Bは各RGB値で各256階調（0～255）であり、色相Hは0°～359°、彩度Sおよび輝度Vは各256階調（0～255）である。また、max（R, G, B）はRGB値の最大値、min（R, G, B）はRGB値の最小値を示す。コンピュータグラフィクスにおいて、色を指定する場合は、通常RGB値またはHSV値を用いる場合がほとんどである。RGB値またはHSV値による色指定はアプリケーションプログラム上だけでなく、プログラミングの際にも広く用いられている。

HSV表色系は、ディスプレイ装置ごとのR, G, B値の三原色により定義されることから、機器依存の表色系である。色相については、前述のとおりxy色度図上における三角形の領域内の点となる。また、輝度については、CIE輝度値Yは、HSV輝度Vに比例しない。多くのディスプレイ装置では、HSV輝度が上昇するにつれ急激に輝度が増加する。この増加の仕方は、 γ （ガンマ）を2～3程度の定数として、概ね

$$\text{相対輝度} \propto (\text{HSV輝度})^\gamma$$

のように書くことができる。この性質をディスプレイ装置の γ 特性と呼ぶ。ディスプレイ装置においてこのような設定がなされている理由は、人間の視覚が、低輝度での輝度変化に対してより敏感であるため、高輝度領域でより変化率を大きくする必要があるのである¹⁷⁾。

3.2 sRGB表色系

デジタル化の進展とともに、色再現の際に、人間の意図通りに色情報を扱う色管理（color management）は非常に重要視されるようになった。しかし、前項で述べたとおり、コンピュータで扱うRGB表色系およびこれと同等なHSV表色系は機器依存であるため、このままでは色管理は難しい。正確な色管理のためには、コンピュータで扱う色の標準化が必要である。

このような背景から、sRGB表色系は、入出力機器の扱うRGB値の標準規格として、1996年にHewlett-

Packard社とMicrosoft社が共同で開発・提案し、1999年にIEC（International Electrotechnical Commission：国際電気標準会議）の色空間国際規格（IEC61966-2-1）として採用された¹⁸⁾。sRGB表色系における光の三原色、白色、および各色の階調は、全てCIEXYZ表色系に基づいて定義されている。

sRGBでは、規格にあった機器であればどのような機器でも簡単に接続でき、色管理が容易になる。また逐次RGB値と測色値との変換が不要であることから、計算時間等のコンピュータの資源を節約できる利点を持っている。WindowsPC利用環境を中心として、近年のデジタルカメラ、CRT、LCD、プロジェクタ等はsRGB規格に準拠したものが多くなりつつある。ただし、コンピュータグラフィクスの発色を決定する際には、本体（OS）、グラフィックカード、モニタの各ハードウェア特性および各種設定等の多くの要因が寄与することから、sRGB規格に厳密には一致しない場合も多いのが現状である。

3.3 表色系の相互変換

本章で取り上げたHSVおよびsRGB表色系とCIE表色系との相互の関連を図4に示す。なお、この図はPoyntonの分類（2003）¹⁹⁾に基づいて作成したものである。表面色の色空間は、図4の通り、「線形三刺激値」、「知覚均等系」、「色相指向系」の3つのカテゴリーに分類することができる。なお、sRGBに関してはその色相は知覚均等系ではないが、 γ 変換後の明るさに関しては均等となっているため、「知覚均等系」としてカテゴライズしてある。

一般のRGB値（HSV表色系）は機器依存性から、そ

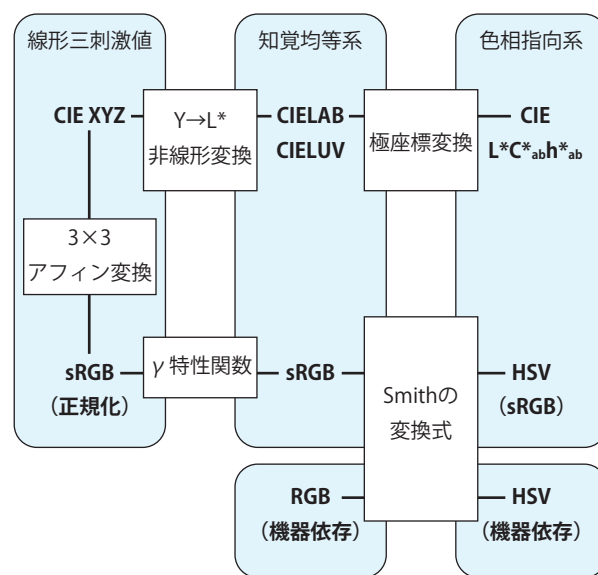


図4 色空間の相互関連図

のままでは客観的な量として定義することができない。その定量化のためには、各RGB値の測色等によって、CIE XYZ表色系等へ変換することが必要となる。

4. 実験1－色覚閾における実験

前述の通り、本研究では2つの実験、すなわち色覚閾値法による色覚閾での実験、および明るさマッチング法による色覚閾上での実験を実施した。本章では、このうち色覚閾における実験（実験1）について、その実験概要、実験方法および実験結果について述べる。

4.1 実験概要

(1) 実験状況

実験状況を図5に示す。実験は反射光による影響を避けるため暗室にて実施した。本実験では円形テスト刺激光を15インチLCDの中央部に呈示する。被験者の頭部は、視角による輝度変化の影響を避けるため顎台にて固定する。被験者はキーボード操作により、テスト刺激光のHSV輝度をリアルタイムに調整し、特定の輝度で応答することができる。

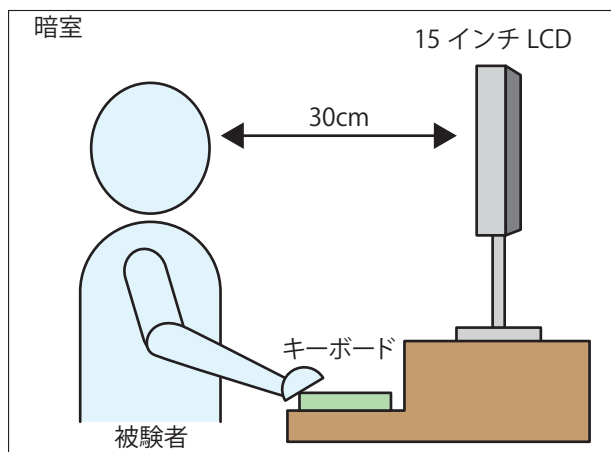


図5 実験状況

(2) 白内障再現ゴーグル

本実験で使用した白内障再現ゴーグルを図6に示す。このゴーグルは、カナダのオンタリオ州政府が開発した「インスタントシニア」プログラムで用いられたものであり、水晶体の混濁を再現した「白濁フィルタ」と、白内障水晶体の分光透過率を再現した「色フィルタ」とにより白内障視環境を再現している²⁰⁾。

この白内障再現ゴーグルの単色光（赤、緑、青）に対する分光透過率を表1に示す。分光透過率のデータより、この白内障再現ゴーグルの再現レベルは70歳代以降に見られる強度の老人性白内障に相当するものであることが分かる。



図6 白内障再現ゴーグル

波長	分光透過率
435nm (青色光)	20%
546nm (緑色光)	45%
700nm (赤色光)	70%

表1 白内障再現ゴーグルの分光透過率

(3) テスト刺激光

本実験では、テスト刺激光としてHSV表色系における色相（以下、HSV色相）で0°から30°間隔の12色および白色を用いた。また、各HSV色相に対する理解を助けるため、各色相に近い色に基づいて略称を付けた。表2にV=97（白色光で輝度15cd/m²に相当）のときの各色の色度（CIE1931表色系）の測光値を示す。

表示色		色度 (CIE1931 XYZ表色系)		
HSV色相	略称	Y (cd/m ²)	x	y
0°	R	3.5	0.564	0.332
30°	RY	5.1	0.510	0.382
60°	Y	12.3	0.407	0.471
90°	YG	9.7	0.321	0.528
120°	G	8.9	0.293	0.546
150°	GC	9.3	0.267	0.472
180°	C	11.3	0.215	0.315
210°	CB	4.1	0.172	0.176
240°	B	2.6	0.156	0.127
270°	BM	3.2	0.185	0.141
300°	M	5.7	0.285	0.188
330°	MR	3.7	0.451	0.275
—	W	15.0	0.291	0.316

表2 HSV輝度V=97（白色光15cd/m²相当）におけるxy色度

また、図7にHSV輝度値に対するCIE1931表色系輝度（以下、CIE輝度）の測光値を、R、G、BおよびWの各色についてプロットしたグラフを示す。

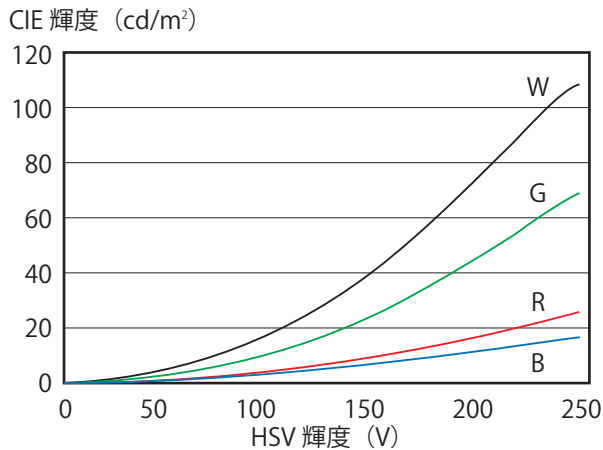


図7 HSV輝度に対するCIE輝度の測光値

4.2 実験方法

実験1では、被験者に対し視距離30cm、視角2°の円形のテスト刺激光を呈示する。図8に被験者への呈示画面のイメージを示す。

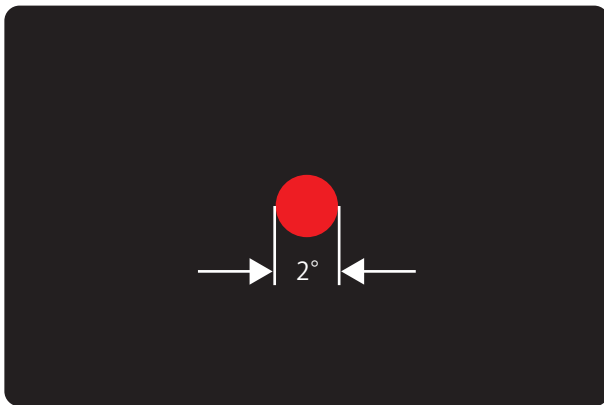


図8 被験者への呈示画面のイメージ (実験1)

被験者は図8のテスト刺激光のHSV輝度をV=82(白色光で10cd/m²に相当)から徐々に減少させ、刺激は検出できるが色みに分からなくなる時点(色覚閾値)でキーボードのキーを押して応答する。応答時のHSV輝度は実験用ソフトウェアによって自動的に記録される。この手順を白内障再現ゴーグルを装着した場合(白内障視環境下)とそうでない場合において実施し、その測定結果を比較する。測定に使用したテスト刺激光は表2のHSV色相0°から30°間隔の12色である。

実験手順のフロー図を図9に示す。各被験者への12色のテスト刺激光の呈示を1セッションとし、白内障視環境下5セッション、そうでない場合5セッション、計10セッションを行った。また、暗室への入室時には20分間、白内障再現ゴーグル装着時には30分間の順応時間を設定した。被験者は19~20歳の色覚正常者6名である。

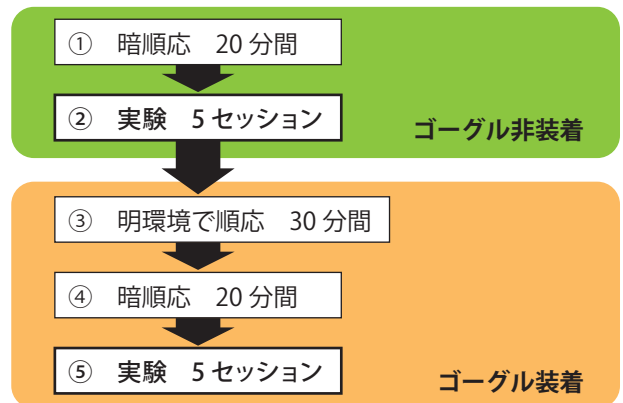


図9 実験手順のフロー図(実験1)

4.3 実験結果

実験結果を図10に示す。図10は色覚閾値法(実験1)による実験における色覚閾値(HSV輝度)を、白内障再現ゴーグル装着時およびそうでない場合についてHSV色相の位相順にプロットしたものである。点線はゴーグル装着時、細実線はそうでない場合の各被験者の平均値を示す。丸太実線は前者の、三角太実線は後者の場合の被験者応答値の平均値を示す。ここで両平均値の差dT(H)は白内障再現ゴーグル装着による、すなわち白内障による影響を表すものとなる。この平均値差dT(H)をHSV色相の極座標で表示したグラフを図11に示す。

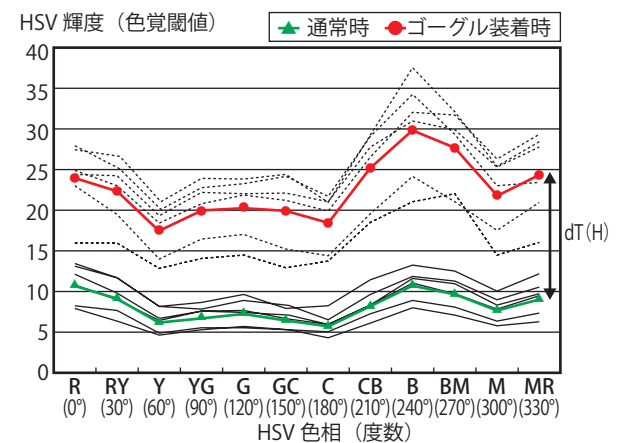


図10 被験者応答値の色覚閾値の比較(実験1)

HSV表色系においては、等しいHSV輝度値を持つ光源色R(HSV色相0°、以下括弧内は度数を表す)、G(120°)、B(240°)を加法混色すると白色となることから、HSV輝度は各色光の相対的な明るさを示す量であると考えることができる。実験1の結果より、白内障視環境下ではそうでない場合に比べて、全てのHSV色相において色覚閾値である被験者応答値の上昇、すなわち感度の低下が見られた。色相別の分布を見ると、Y(60°)、C(180°)、M(300°)において極小値を取る一方、RおよびBにおい

ては極大値を示している。特に白内障視環境下では青系統 (HSV 色相 210°~270°のHSV 色相領域) における被験者応答値の上昇、すなわち感度低下の度合いが大きいという結果が得られた。

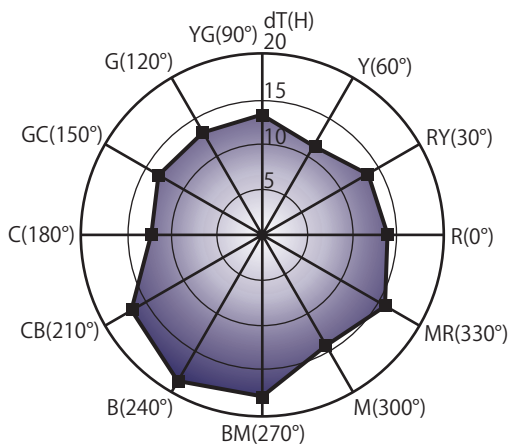


図11 応答値差dTのHSV色相による極座標表示 (実験1)

HSV輝度値については、視知覚についてある程度の線形性を考慮して定義されているものの、厳密には明るさに関する均等性は保証されていない。したがって定量的な比較のためには視知覚均等量のCIE 1976明度指数 (以下、CIE明度) L^* に変換する必要がある。このとき、もしテスト刺激光が完全にsRGB規格に準拠していれば、変換式を用いて、CIE輝度 Y から L^* を計算することができる。しかし、今回の実験で使用したテスト刺激光は、全体的にはsRGBに近似した輝度および色相を持っているものの、各光源色の xy 色度値および全体的な y 特性が若干異なるため、変換式を利用することができない。そこで、今回はHSV輝度に対するCIE輝度の測色値からCIE輝度 Y を求め、そこから L^* を計算する方法を適用する。具体的な計算手順およびその結果は以下の通りである。

まず、白色光について y 特性を表すベキ乗関数の近似式 $Y=a \cdot (V/255)^b$ のパラメータ a および b を最小自乗法で求めた。その結果ガンマ特性値 b として、2.257を得た。このガンマ特性値に基づいて、各HSV色相について最小自乗法を適用し係数 a を求めた。近似区間としては、背景輝度および輝度飽和の影響を受けないと考えられる $50 \leq V \leq 210$ の範囲の測光値を用いた。表3に、各HSV色相について求めた a を示す。ここで、係数 a は $V=255$ のときの最高輝度を上回っているが、これは今回のテスト刺激光の $V > 210$ での輝度飽和によるものであると考えられる。

HSV色相	a	HSV色相	a
R (0°)	27.60	C (180°)	95.75
RY (30°)	44.22	CB (210°)	35.66
Y (60°)	103.44	B (240°)	19.31
YG (90°)	83.35	BM (270°)	25.24
G (120°)	75.59	M (300°)	46.45
GC (150°)	80.88	MR (330°)	30.99

表3 最小自乗法で求めた $Y=a \cdot (V/255)^{2.257}$ の係数 a

次に、表3で求めたパラメータ a およびガンマ特性値2.257を用いて、被験者応答値のHSV輝度からCIE輝度 Y を求める。ただし、 $V < 10.3$ ($(V/255) < 0.04045$)の弱い光に対しては、sRGB規格に準拠して、ベキ乗関数ではなく、 $V=10$ のときの Y の値と原点とを結ぶ直線で近似する。このようにして求めたCIE輝度 Y を、CIE明度 L^* に換算するが、実験1の被験者応答値に対応するCIE輝度はすべて $Y / Y_n \leq 0.008856$ の関係式を満たすため、換算式として $L^*=903.3 (Y / Y_n)$ の計算式を使用する。ここで Y_n は規格化の係数であり、測光値より $Y_n=110$ とする。

このようにして、被験者応答値を換算した結果を図12に示す。図12は色相間の絶対的な明度の違いに基づくグラフとなっているため、その分布はHSV輝度に基づく図10と大きく異なるものとなっている。

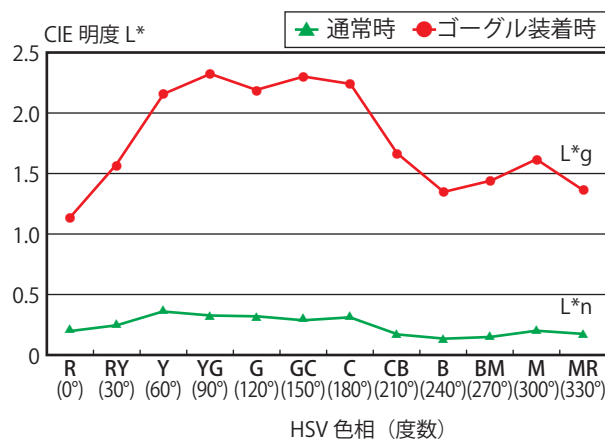


図12 被験者応答値のHSV輝度 V から計算したCIE明度 L^* (実験1)

L^* 値は絶対的な明度を表しているため、白内障再現ゴーグル装着による影響を明らかにするためには、色相間での相対的な明度の比較ではなく、色相別にその明度の上昇率を明らかにする必要がある。そこで、白内障視環境下における明度を通常時の明度で割ることにより、各HSV色相について明度変化率 $L^*_r = L^*_g / L^*_n$ を求める。図13に、HSV色相別の明度変化率を棒グラフとして示す。

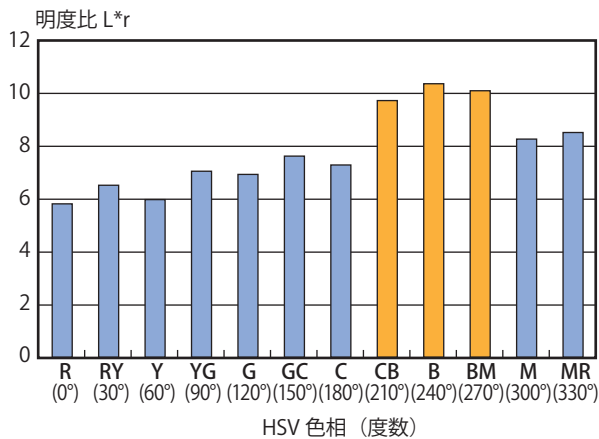


図13 被験者応答値のCIE明度L*の変化率L*r (実験1)

図13より、CIE明度L*の変化率は、特に青系統（CB（210°）からBM（270°）まで）のHSV色相領域（グラフ中に濃色で表示）で上昇していることが分かる。この明度変化率の有意性を検証するためにt検定を実施した。その結果を表4に示す。青系統の各色（CB、B（240°）、BM）の各色の明度が、青系統以外の色相領域に対して有意に上昇しているHSV色相について、有意水準1%の場合は「**」、有意水準5%の場合は「*」印を表中に記す。

	R 0°	RY 30°	Y 60°	YG 90°	G 120°	GC 150°	C 180°	M 300°	MR 330°
CB 210°	**	**	**	*	*	*	**		
B 240°	**	*	*	*	*	*	*	*	
BM 270°	*	*	*		*		*	*	*

表4 実験1における明度変化率上昇の有意性検定（t検定）

表4より、青系統のHSV領域における明度変化率は他の多くのHSV色相に比較して有意に上昇していることが分かる。換言すると、色覚閾の白内障視環境下では、青系統のHSV色相領域において感度の低下が見られたことになる。この結果は図11で表されているような、HSV表色系における被験者の応答値差dTの分布傾向と合致している。

5. 実験2－色覚閾上における実験

実験1（前章参照）の結果、白内障視環境下では210°～270°のHSV色相領域における被験者応答値の上昇すなわち感度の低下が観測され、その傾向はCIE明度L*値への換算による変化率の計算からも裏付けられた。続いて、より輝度レベルの高い色覚閾上における色覚特性を明らかにするために、明るさマッチング法による実験を実施した。本章では、この色覚閾上における実験（実験2）について、その実験概要、実験方法お

よび実験結果について述べる。

5.1 実験概要

本実験は、実験1と同等の環境下で実施した。すなわち実験状況は4.1（1）のとおり、暗室にて円形のテスト刺激光を視距離30cmで15インチLCDの中央部に呈示する。このとき被験者はテスト刺激光のHSV輝度を調節し、キーボードを用いて特定のHSV輝度で応答することができる。白内障再現ゴーグルは「白濁フィルタ」と「色フィルタ」とにより白内障視環境を再現するもので、その分光透過率は4.1（2）に示すとおり、強度の老人性白内障に相当するものである。実験に使用したテスト刺激光はHSV色相0°から30°間隔の12色および白色である。

5.2 実験方法

実験2では、被験者に対し視距離30cm、視角2°の2つの円形光を呈示する。図14に被験者への呈示画面のイメージを示す。左側の円形光が白色参照光であり、その輝度は15cd/m²である。右側の円形光がテスト刺激光である。

被験者は図14右側のテスト刺激光のHSV輝度を調節して、左側の白色参照光（15cd/m²）と明るさが同一と感じられる点で応答する。この手順を白内障再現ゴーグルを装着した場合（高齢者視環境下）とそうでない場合において実施する。測定に使用したテスト刺激光は表2のHSV色相0°から30°間隔の12色である。

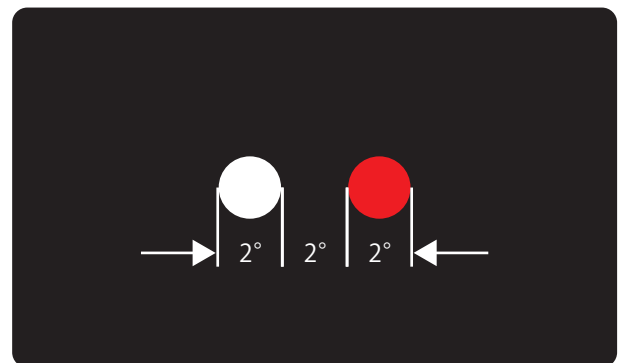


図14 実験2における被験者への呈示画面のイメージ（実験2）

実験手順のフロー図を図15に示す。各被験者への12色のテスト刺激光の呈示を1セッションとする。予備実験の結果、測定値の偏差が大きかったため、実験2では白内障視環境下7セッション、そうでない場合7セッション、計14セッションを行った。また、暗室への入室時には20分間、白内障再現ゴーグル装着時には30分間の順応時間を設定した。被験者は19～20歳の色覚正常者5名である。

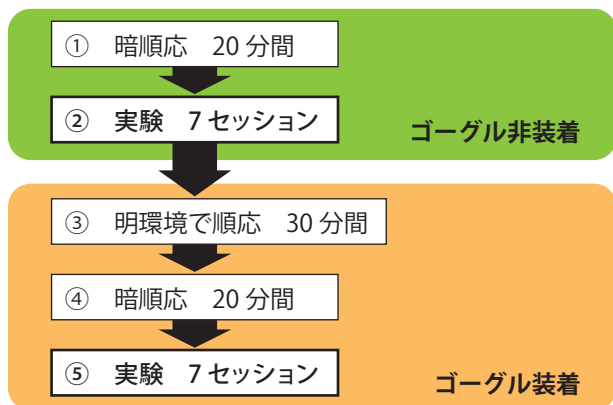


図15 実験手順のフロー図 (実験2)

5.3 実験結果

実験結果を図16および図17に示す。図16は図10と同様なグラフであり、明るさマッチング法(実験2)による実験における被験者応答値(HSV輝度)を、白内障再現ゴーグル装着時およびそうでない場合についてHSV色相の位相順にプロットしたものである。また図17は図11と同様に、平均値差 $dT(H)$ をHSV色相の極座標で表示したグラフである。

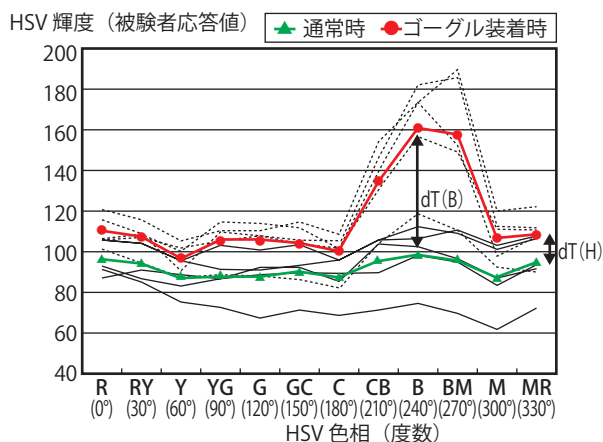


図16 被験者応答値の色覚閾値の比較 (実験2)

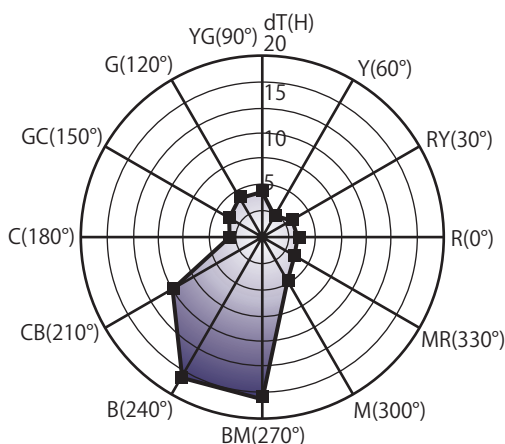


図17 応答値差 dT のHSV色相による極座標表示 (実験2)

実験2においても、実験1と同様に、全てのHSV色相において被験者応答値の上昇、すなわち感度の低下が見られた。色相別の分布を見ると、Y(60°), C(180°), M(300°)において極小値を取る一方、R(0°)およびB(240°)においては極大値を示しており、これも実験1と共通した結果となっている。

また、実験1においても青系統(HSV色相210°~270°のHSV色相領域)における感度低下が見られたが、実験2ではこの領域における白内障視環境下での被験者応答値が急激に上昇しており、CB(210°), B, BM(270°)における被験者応答値差は、他の色相における応答値差と比較して極めて大きくなっている。よって色覚閾上では、白内障視環境下における青系統の位相領域の感度低下の傾向が特に顕著であることが明らかになった。

次に、実験1と同様の手順で、被験者応答値のHSV輝度値 V を変換し、視知覚均等量のCIE明度 L^* を求める。実験2は、実験1と比較してそのCIE輝度およびCIE明度が十分に大きいため、実験1の多くのデータに適用された直線近似を用いる必要はない。すなわち、表3で求めたベキ乗関数 $Y = a \cdot (V/255)^{2.257}$ の係数 a を用いてHSV輝度値 V からCIE輝度値 Y を求め、さらに変換式 $L^* = 116 \cdot (Y/Y_n)^{1/3} - 16$ を用いて L^* 値を計算した。ここで Y_n は規格化の係数であり、測光値より $Y_n = 110$ とする。図18にその結果をグラフ形式で示す。

実験1の場合と同様に、白内障視環境下における明度を通常時の明度で割ることにより、各HSV色相について明度変化率 $L^*_r = L^*_g / L^*_n$ を求める。図19に、HSV色相別の明度変化率を棒グラフとして示す。

図19より、CIE明度 L^* の変化率は、実験1の場合と同様に、特に青系統(CB(210°)からBM(270°)まで)のHSV色相領域(グラフ中に濃色で表示)で上昇していることが分かる。この明度変化率の有意性を検証するために t 検定を実施した。その結果を表5に示す。青系統の各色(CB, B(240°), BM)の各色の明

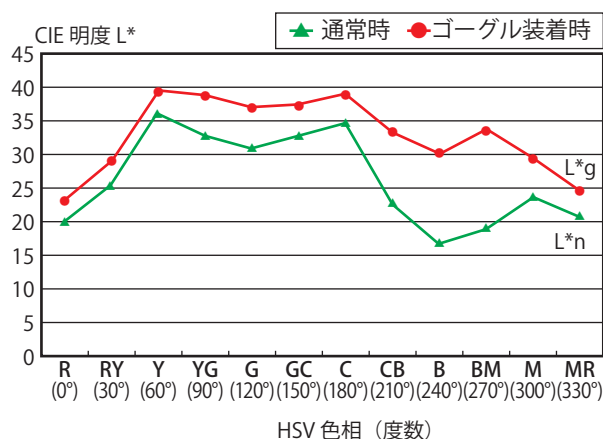


図18 被験者応答値のHSV輝度 V から計算したCIE明度 L^* (実験2)

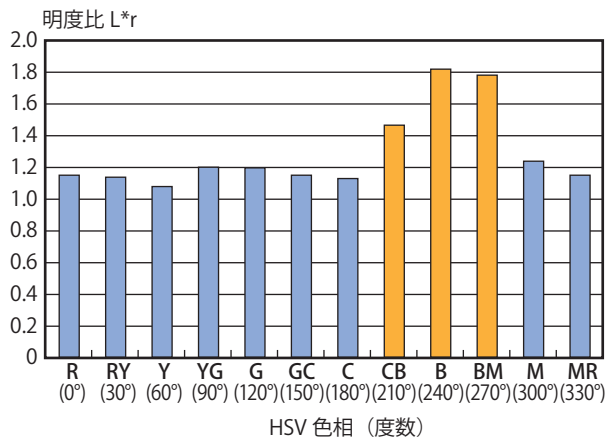


図19 被験者応答値のCIE明度L*の変化率L*r (実験2)

度が、青系統以外の色相領域に対して有意に上昇しているHSV色相について、有意水準1%の場合は「**」、有意水準5%の場合は「*」印を表中に記す。

	R 0°	RY 30°	Y 60°	YG 90°	G 120°	GC 150°	C 180°	M 300°	MR 330°
CB 210°	*	*	*	*	*	*	*	*	**
B 240°	*	*	**	**	**	**	**	**	**
BM 270°	*	*	*	*	*	*	*	*	*

表5 実験2における明度変化率上昇の有意性検定 (t検定)

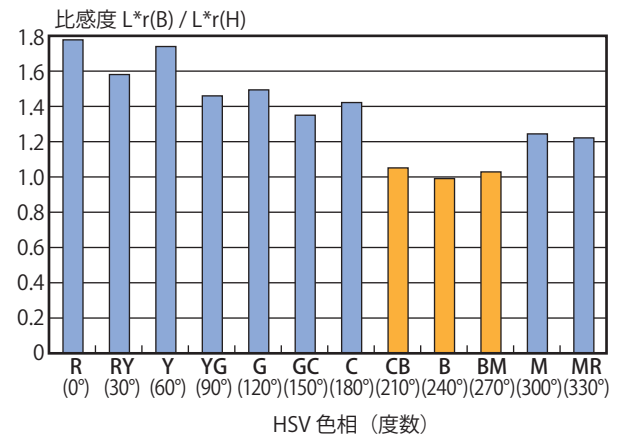
表5より、青系統のHSV領域における明度変化率は、他の全てのHSV色相に比較して有意に上昇していることが明らかになった。すなわち、色覚閾上の白内障視環境下において、青系統のHSV色相領域において有意な感度の低下が見られ、その程度は色覚域で測定した場合よりも顕著であった。図17に見られる、HSV表色系における被験者の応答値差dTの分布傾向も、この結果を裏付けている。

6. 考察

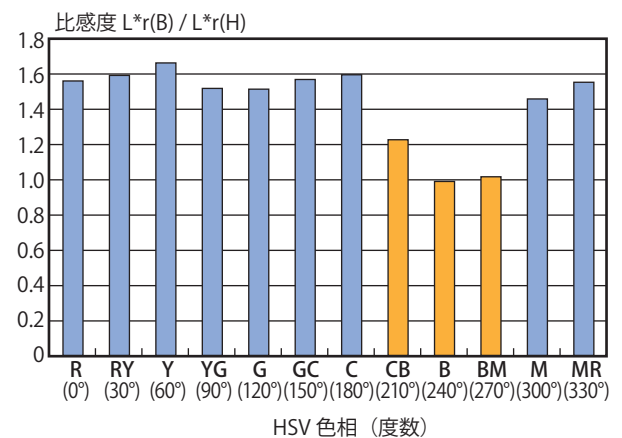
色覚域における実験1の結果、白内障視環境下で青系統のHSV色相領域(210°~270°)における被験者応答値のHSV輝度の上昇、すなわち感度の低下が観測された。被験者観測値のHSV輝度をCIE明度L*値に換算し、明度変化率を計算した結果も同様な傾向を示した。色覚閾上における実験2においても、実験1と同様に白内障視環境下で青系統における感度の低下が観測され、この傾向は実験1よりも顕著であった。本章では以上の実験結果について、特に加法混色によってVDTの色光を構成する赤(R)、緑(G)、青(B)の3つの光源色による影響を中心として考察を行う。

6.1 青系統の色相領域における感度低下について

実験結果より得られた青系統のHSV色相領域における感度低下の傾向をよりわかりやすく表示するため、明度変化率の逆数に相当する感度を求める。このときの基準値を青色光B(240°)に対する明度変化率とし、比感度を $S_r(H) = L^*_r(B) / L^*_r(H)$ で定義する。ここで、 $S_r(H)$ は比感度、 $L^*_r(B)$ は青色光に対する明度変化率、 $L^*_r(H)$ は各HSV色相に対する明度変化率である。図20に各HSV色相に対する比感度のグラフを示す。



(a) 色覚域における実験 (実験1)



(b) 色覚閾上における実験 (実験2)

図20 各HSV色相に対する比感度

図20より、青系統における感度低下の傾向が明瞭に伺える。

このような青系統における感度低下が起きる原因として、白内障によって混濁した水晶体の青色光に対する分光透過率が低下していることがその一因であると考えられる。そこで、CIE xy色度図を用いて、VDTの色光を構成するR(0°), G(120°), B(240°)の三色についてその主波長および刺激純度を求める。

図21のxy色度図上にHSV輝度V=97(白色光のCIE輝度15cd/m²相当)における、R, G, Bおよび白色光(x

=y=0.333)の色度座標を取る。白色光と各色光のxy色度座標を結ぶ直線を外側に延長するとき、外周の単色光軌跡との交点の単色光波長が主波長となり、その直線上における白色光-単色光軌跡と白色光-各色光の距離の比が刺激純度となる。その結果R,G,Bに対する主波長はそれぞれ611nm、544nm、474nmであり、刺激純度はそれぞれ0.694、0.538、0.814であった。

一方、これらの単色光に対応する白内障再現ゴーグルの分光透過率は61%、45%、27%である。よって、青色光は、赤及び緑色光と比較した場合、刺激純度すなわち単色光を含む割合が高いため、白内障視環境下において、水晶体の混濁による短波長領域での分光透過率の低下の影響をより強く受けるため、その感度が大きく低下すると考えられる。

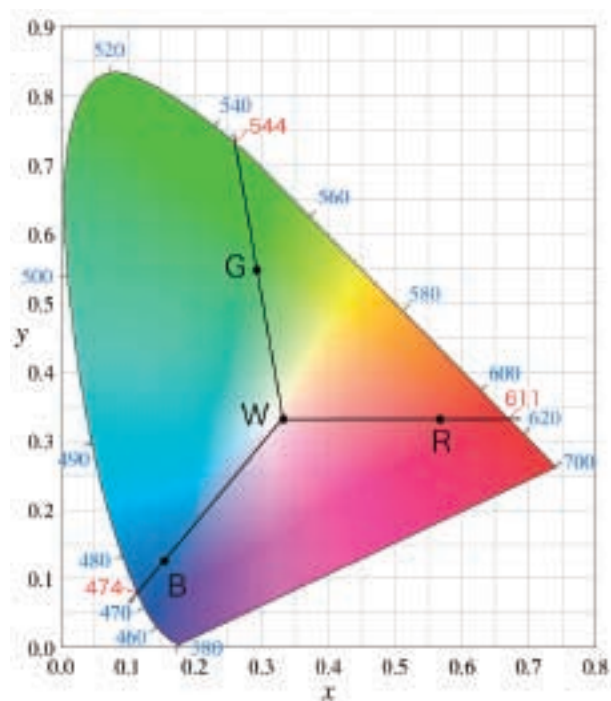


図21 HSV輝度V=97における光源色R,G,Bの主波長

このとき、各実験における白内障視環境下でのCIE輝度の減少率を、通常時の被験者応答値のCIE輝度を白内障再現ゴーグル装着時の被験者応答値のCIE輝度で割った値として定義する。表6に、R,G,Bの各色に対する、主波長、刺激純度、白内障再現ゴーグルの分光透過率、実験1および2におけるCIE輝度減少率をまとめて示す。

光源色	主波長	刺激純度	分光透過率	輝度減少率	
				実験1	実験2
R(0°)	611nm	0.694	61%	17.1%	77.4%
G(120°)	544nm	0.538	45%	14.4%	69.4%
B(240°)	474nm	0.814	27%	9.6%	33.5%

表6 分光透過率と輝度減少率との比較

表6より、色覚閾の輝度減少率は、各単色光に対するゴーグルの分光透過率と比較して大幅に低い値となっている。この結果は、色覚閾の輝度領域における感度低下の原因は、水晶体の黄変化による分光透過率の低下だけでなく、水晶体核内の物質による光の反射・散乱の影響も大きいことを示唆している。

一方、色覚閾上においては、輝度減少率が白内障再現ゴーグルの各色に対する分光透過率に概ね対応した値となっている。よって、色覚閾上の輝度領域における感度低下は、主として水晶体の黄変化による分光透過率の低下が大きく影響していると考えられる。

6.2 白内障による感度低下への対策

これまでの実験および検討結果より、白内障を持つ人に対してVDT上で情報呈示を行う際に留意すべきいくつかの点が明らかになった。まず、白内障視環境下では、色光に対する感度が全般的に低下するために、情報呈示の際には十分な輝度を確保する必要がある。特に色覚閾付近の低い輝度では視認性の低下が著しいことから、グラデーション表示等によって、情報が読み取れない状態が生じないように注意が必要である(図22(上)参照)。

また、黒を背景色とした画面において、青系統のHSV色相領域にある色を表示色として単独で使用する場合、コントラストの低下によって、その視認性に問題を生じる可能性があることが分かった。コンピュータグラフィクスにおいてRGB値は等しく256階調を持

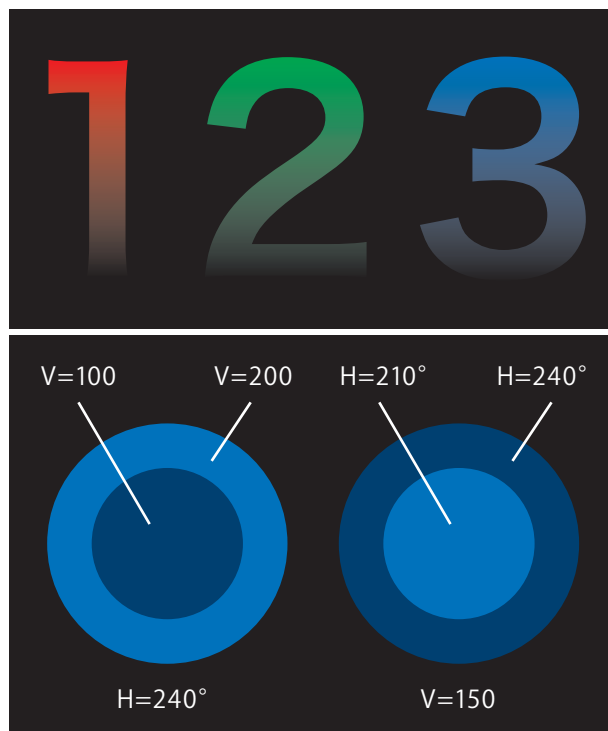


図22 白内障視環境下での不適切な情報提示例

つ量として扱われることから、プログラミング等においてB値を設定する際に、RおよびG値と同様の値が機械的に割り振られる場合があるが、B値の設定には十分注意して、白内障を持つ人にとって見づらくならないようにする必要がある（図22（下）参照）。

青系統における感度低下の対策として、光源となる青色光の輝度の上方補正が有効であると考えられる。例えば、実験2におけるR,G,Bの各光源色に対する被験者応答値のCIE明度および明度変化率を表7に示す。

光源色	被験者応答値のCIE明度指数		明度変化率
	通常時	ゴーグル装着時	
R (0°)	19.86	22.98	1.16
G (120°)	30.68	36.76	1.20
B (240°)	16.36	29.84	1.82

表7 実験2におけるR,G,B各光源色の明度変化率

ここで問題となるのはBにおける明度変化率が1.82と他の光源色と比較して高いことである。Bの増加率も他の光源色と同等の1.16~1.20にするためには、Bにおけるゴーグル装着時のCIE明度の平均値29.84を18.98~19.63の範囲にまで減少させる必要がある。これはBのCIE輝度で3.02~3.18cd/m²に相当する。図22はHSV輝度80~170の領域におけるR,G,B各色のCIE輝度の測光値を、最小自乗法によって近似したベキ乗曲線として表示したものである。また、図中にR,G,B各色に対する被験者応答値の平均値g(R),g(G),g(B)（ゴーグル装着時）、n(R),n(G),n(B)（通常時）に対応した点を示す。

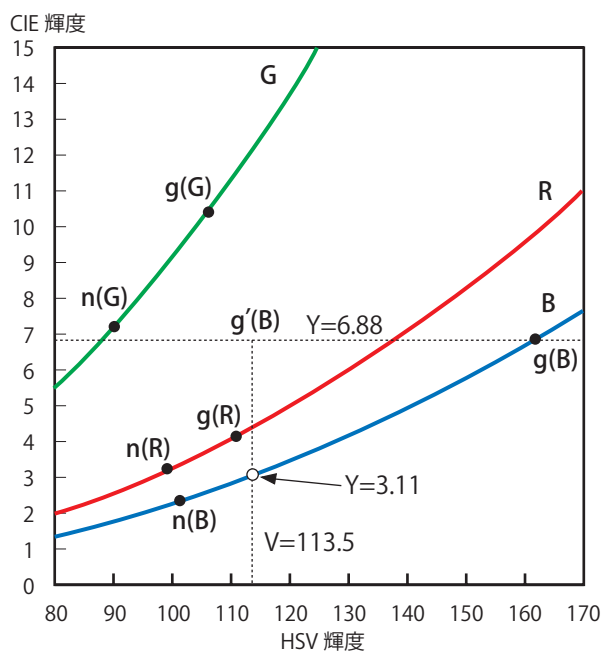
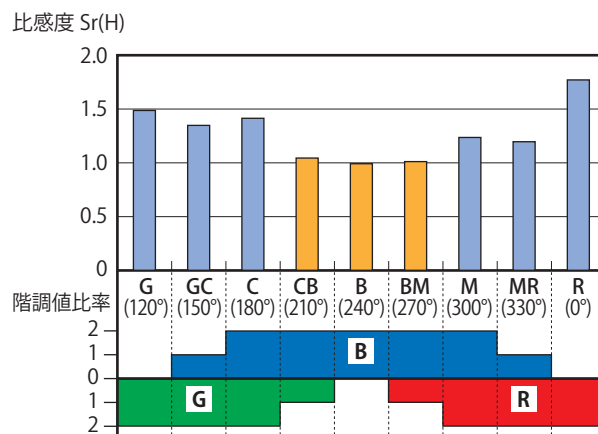


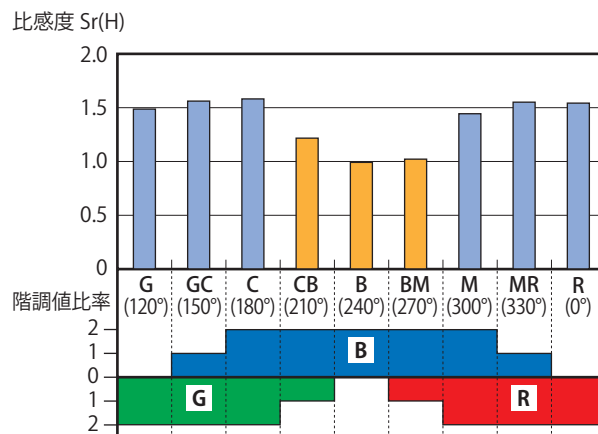
図23 青色光のCIE輝度上方補正

g(B)のCIE輝度は近似式より6.88 cd/m²となる。このときBに対する望ましい被験者観測値g'(B)のCIE輝度を、両端の平均である3.11 cd/m²と仮定する。このとき、Bのベキ乗関数による近似式によって、この3.11cd/m²に対応する被験者応答値のHSV輝度値を求めると113.5となる。換言すると、V=113.5において、BのCIE輝度が6.88cd/m²であれば被験者は応答し、他の光源色と同様の傾向を示すことになる。このとき、このHSV輝度113.5において、6.88-3.11=3.77cd/m²のCIE輝度上方補正が必要であることになる。

また別の対策として、青系統のHSV色相領域の色光を他のHSV色相領域の色光で代替することが考えられる。図24は、図20に基づいて、B(240°)を中心とするHSV色相領域における比感度の棒グラフと、横軸のHSV色相をRGB各色の階調値の比率として表示したものをブロック図として横軸の下に併せて示したものである。



(a) 色覚閾における実験（実験1）



(b) 色覚閾上における実験（実験2）

図24 B(240°)を中心とした領域の比感度およびRGB各色の階調値比率

図24より、実験1および実験2のいずれの場合においても、Bに対して、RまたはGの光源色が等分以上の比率で含まれる位相領域では感度が向上していることが分かる。青色光の輝度補正による感度の改善法は、比較的低い輝度領域で適用可能であるが、LCDのように白色バックライト光をフィルタリングして表示する種類のディスプレイ装置では、上限を超えて青色光の輝度を補正することができない。この場合は、図24に示されているとおり、青系統の代わりに、表示色として他の光源色が青色に対して同等以上の割合で含まれるHSV色相領域の色を使用すると感度が向上し、視認性を改善する効果があると考えられる。

7. おわりに

本研究では若年者を被験者として、VDT上の中心部に呈示されるHSV色光に対する応答を、白内障再現ゴーグルを装着した場合とそうでない場合についてそれぞれ測定する実験を実施し、その結果について考察した。その結果、以下の結論が得られた。

(1) 色覚閾における実験の結果、白内障視環境下では、全てのHSV色相において被験者応答値の上昇、すなわち感度の低下が見られた。特に白内障視環境下では青系統のHSV色相領域(210°~270°)における感度低下の度合いが大きく、この領域における明度変化率は、他の多くのHSV色相に対して有意に上昇していることが明らかとなった。

(2) 色覚閾上における実験でも、色覚閾における実験と同様に、白内障視環境下における全てのHSV色相において被験者応答値の上昇、すなわち感度の低下が見られ、特に白内障視環境下における青系統のHSV色相領域で大きく感度が低下した。このとき、青系統の明度変化率は、他の全てのHSV色相に対して有意に上昇しており、感度低下の傾向は色覚閾における実験よりも顕著であった。

(3) テスト刺激光の光源色R(0°),G(120°),B(240°)について、主波長および刺激純度を求めた結果、BはRおよびGと比べて刺激純度が高く、Bでの白内障再現ゴーグルの分光透過率が低い影響をより強く受けるため感度が低下すると考えられる。また、テスト刺激光の輝度減少率と白内障再現ゴーグルの分光透過率との比較より、色覚閾では水晶体内の核物質による反射・散乱の影響が大きいことを示唆している。一方、色覚閾上では水晶体の黄変化による分光透過率の低下の影響が大きいと考えられる。

(4) 白内障視環境下では、色光に関する感度が全体的に低下するため、VDTによる情報提示の際は十分な輝

度を確保する必要がある。また、黒色の背景で、青系統のHSV色相領域にある色を使用する場合、コントラストの低下に留意する必要がある。青系統における感度低下の対策として、青色光の輝度上方補正が有効であると考えられる。色覚閾上の実験に基づいて計算した結果、HSV輝度113.5でCIE輝度3.11cd/m²の青色光に対して3.77cd/m²の輝度上方補正が必要である。また、LCDのように青色光の輝度に上限がある場合は、青系統の代わりに、他の光源色が同等以上の割合で含まれるHSV色相領域の色を使用すると感度が向上し、視認性を改善する効果があることが明らかになった。

情報化の進展とともに、日常生活の中でVDTが使用される比率は今後ますます大きくなっていくと予想される。高齢者に配慮したVDT表示のガイドラインはISOあるいはJIS規格として着々と規格化されつつあるが、その具体化のためには実際の設計時にコンピュータグラフィクスで使用されるRGBあるいはHSV表色系における検討が不可欠であると考えられる。本研究の実験手法および評価手法に基づく実用的な応用実験によって、望ましい視覚バリアフリー環境の実現に資することができれば幸いである。

注釈

本研究の実験データおよび考察の一部は、以下の原著論文等で公表している。

- 1) 藤田徹也・中嶋芳雄・高松衛：「液晶ディスプレイを用いた高齢者の色覚特性に関する研究」、人間工学、Vol.43、No.3、pp.132-137、日本人間工学会(2007)(日本人間工学会平成20年度研究奨励賞受賞論文)
- 2) 藤田徹也・中嶋芳雄・高松衛：「白内障視環境下におけるディスプレイ装置に対する色覚特性に関する研究」、視覚の科学、Vol.28、No.1、pp.26-30、日本眼光学学会(2007)

引用・参考文献

- 1) 市川一夫：「眼内レンズと水晶体の分光透過性」、あたらしい眼科、Vol.9、No.6、pp. 1159-1160(1992)
- 2) 厚生労働省：平成17年度患者調査 第132表「総患者数(患者住所地)性・年齢階級×傷病大分類×都道府県別(全国)」(2005)
- 3) 総務省統計局：平成17年度国勢調査第一次基本集計結果「結果の概要 2 年齢別人口」(2007)
- 4) 日本規格協会：「高齢者・障害者等配慮設計指針—情報通信における機器、ソフトウェアおよびサー

- ビスー第2部：情報処理装置」(2004)
- 5) 日本規格協会：「高齢者・障害者等配慮設計指針－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)
- 6) 岡嶋克典・吉田博・氏原彰：「輝度コントラストの加齢変化に基づく高齢者の色認識性評価法－計算シミュレーションと高齢者水晶体疑似フィルター」、日本色彩学会誌、Vol.24、No.3、pp. 164-170 (2000)
- 7) 岡嶋克典・高橋正典：「マンセル色票の色名称における高齢者水晶体疑似フィルタ装着の効果」、照明学会誌、Vol.84、No.11、pp.838-842 (2000)
- 8) 池田光男・久住亜津沙・小浜朋子・篠田博之：「白内障疑似体験ゴーグルによる色票の見えの変化」、日本色彩学会誌、Vol.27、No.2、pp.113-124(2003)
- 9) 小浜朋子・池田光男・久住亜津沙・篠田博之：「白内障疑似体験ゴーグルに入射する環境光によって生じる色票の彩度低下」、日本色彩学会誌、Vol.28、No.2、pp.95-101 (2004)
- 10) 国立社会保障・人口問題研究所：「日本の将来推計人口(平成18年12月推計)」、pp.9 (2006)
- 11) 所敬・吉田晃敏編：「現代の眼科学 改訂第9版」、pp.180、金原出版(2006)
- 12) 岡部正隆・伊藤啓：「色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション(全3回)－第2回色覚が変化すると、どのように色が見えるのか」、細胞工学、Vol.21、No.8、pp.909-929 (2002)
- 13) 坂本保夫：「水晶体の光透過特性」、日本眼光学学会誌「視覚の科学」、Vol.15、No.4、pp.198-205 (1994)
- 14) 岩田三千子：「高齢者の視覚と色彩」、照明学会誌、No.88、Vol.1、pp.34-36 (2004)
- 15) A. R. Smith: "Color Gamut Transform Pairs", ACM SIGGRAPH Computer Graphics, vol.12, issue 3, pp.12-19 (1978)
- 16) J. D. Foley, A. van Dam et al: "Computer Graphics 2nd Edition", pp.584-595, Addison-Wesley (1990)
- 17) 小林光夫：「色再現・色管理・色の見え」、日本色彩学会誌、Vol.26、No.1、pp.18-29 (2002)
- 18) International Electrotechnical Commission:
"Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB" (1999)
- 19) C. Poynton: "Digital Video and HDTV", pp.230, Morgan Kaufmann (2003)
- 20) ユニバーサルデザインフォーラム、「心身の加齢変化と高齢者疑似体験」、UDF NEWS、Vol.18、pp.7 (2002)