

デザイン支援のための白内障色覚表現法の検討

笠原 光輝^{*1} 塚田 敦史^{*1} 池田 卓美^{*2}

青井 清一^{*3} 張 彦芳^{*4} 藤垣 善昭^{*5}

Color representation system of cataracts for design support

Koki Kasahara^{*1}, Atsushi Tsukada^{*1}, Takumi Ikeda^{*2}

Kiyokazu Aoi^{*3}, Zhang Yanfang^{*4}, Yoshiaki Fujigaki^{*5}

Abstract – The purpose of this study is to develop the color representation system of cataracts so that designers can design various products, for example route chart while considering the visual property of cataract patients on a digital screen. To represent color vision characteristics of cataracts, spectral transmittance and scattering light intensity of human lens were applied. Spectral transmittance contributes to lowering of brightness and scattering light intensity does misty vision. Applying them to pixel data (R, G, B) of original image, color represented images of cataracts were obtained. In addition, we proposed to convert spectral transmittance and scattering light intensity into relative data based on transparent lenses. In this method, color constancy is considered. With this conversion, lowering of the brightness, yellow tinge and white opacity could be restrained. Consequently, this color representation system made it possible to obtain the plausible represented image of cataracts. In the future, experiments are necessary to ensuring the validity of this color representation.

Keywords: cataract, spectral transmittance, scattering light intensity

1. はじめに

我が国は高齢化社会である。総務省は^[1]、総人口に占める 65 歳以上の割合が 2060 年頃には約 40%にまで達すると推計しており、今後はより一層高齢化の進展が見込まれる。

このような背景を受けて、国土交通省はバリアフリー新法やバリアフリー整備ガイドラインを作成し、高齢者の自立と社会参加を促す社会づくりを進めてきた。その中では、視覚からの情報伝達を円滑に運ぶための環境整備に関する記述があり、視覚による情報取得を重要視していることがわかる。しかし、この情報取得に重要な視覚の観点でみると、70 歳以上の 90%が視機能に何らかの問題を抱えている。特に 70 歳代の 80%は白内障に罹患していると報告されている^[2]。白内障とは、水晶体が濁ることで物が白くかすんで見えたり、二重にぼやけて見えたりする症状を伴う視疾患であり、加齢により誰しもが発症しうる。これより、高齢化の進展による白内障者の増加は容易に想像できる。一方で、白内障の症状は手術によって改善するが、術後は水晶体が人工レンズに置き

換わるため、自らの筋肉でピントを調節することが困難である。また、白内障に罹患してもすぐに手術はせず、日常生活に支障をきたすようになってから手術を行うことも示唆され^[3]、白内障者が日常生活を送ることを想定しなくてはならない。したがって、デザイナー（設計者）は白内障者の視認性を考慮した環境整備を進めていかなければならない。しかし、一般に白内障者とは視覚特性が異なるため、白内障者の見えを把握しながらデザインすることが難しい。一方で、例えば路線図などの複雑なサインになるほど、事前に見えを把握しておきたいという要求は高い。さらに、デザイナーはパソコン上でモノをデザインしていくことがほとんどであるため、デジタル上で見えを把握したい。

そこで本研究では、デザイナーがデジタル上で白内障者の視覚特性に配慮しながら設計が進められる支援システムの開発を目的とする。本研究目的に関係して、他研究において白内障ないし高齢者の色覚表現について研究がなされてきた。小浜らは^[4]白内障者の見えは水晶体の色変化だけではなく、白濁が大きく関係してくるのではないかと推測し、白内障者の証言などを参考に色フィルタとかすみフィルタからなる白内障疑似体験ゴーグルを開発した。そして、このゴーグルを用いた実験により、かすみフィルタによる環境光が散乱的に眼内に進入し、視対象物体の色の彩度低下をもたらすと結論付けた。岡嶋らは^[5]Pokorny らが提唱する Two-Factor モデルを用いて、高齢者の水晶体黄変変化をシミュレートできる色フィルタを作製した。このフィルタを若年者に装着して、マンセ

*1: 名城大学

*2: 東洋インキ株式会社

*3: 元 TOTO 株式会社

*4: 4allDesign/九州大学

*5: リンナイ株式会社

*1: Meijo University

*2: TOYO INK CO., LTD.

*3: Former TOTO LTD.

*4: 4allDesign/Kyusyu University

*5: Rinnai Corporation

ル標準色票の見えをカテゴリカルカラーネーミング法で測定したところ、フィルタ装着前後で大きく色見えが変化するわけではないが、フィルタ装着後は装着前よりも彩度が低下して知覚されたと報告している。

本研究では、白内障者の色覚特性に着目する。そこで、色覚に影響を与えるであろうヒト水晶体の分光透過率と散乱光強度の2つ医学的パラメータ^[6]を用いることにした。分光透過率は光透過率の低下による明るさの低下や黄色み程度に、散乱光強度は水晶体の散乱による白いベール状の見え（以降白みと表現する）に寄与すると考える。このような色覚表現法を画像処理により検討する。色覚を模擬したい画像に分光透過率と散乱光強度を適用し、画像の画素データ RGB を操作することで色覚模擬画像を得る。

2. 白内障色覚表現に使用するパラメータ

2.1 分光透過率の適用方法

本研究における分光透過率とは、ヒト水晶体へ入射する光に対する出射する光を、可視光領域で波長毎に対応させた光透過率のことを指す。Nishimoto ら^[6]は、30 眼の摘出水晶体から分光透過率を測定し、グラフ化した（図 1）。図 1 の縦軸は光透過率で横軸は可視光の波長領域である。また、光透過率が高い順に水晶体核部が透明性を維持していた眼、以下報告当時の日本白内障疫学研究班分類^[7]に基づく水晶体核部混濁程度Ⅰ、混濁程度Ⅱ、混濁程度Ⅲとなっている。本研究では、これら各 4 程度を晴眼、軽度、中度、重度とし、白内障色覚表現に用いる。

ヒト水晶体の分光透過率についての報告例は倫理的観点などから多くはないが、例えば、文献[6]以外にも宇治^[8]などの貴重な報告がある。しかし、測定年代の古さや医師による進行程度の分類がなされていない時点での報告のため信頼性に乏しい^[9]。したがって、本研究では、これらの点を満たしている Nishimoto ら^[6]の報告を採用した。

まず、分光透過率を画像に適用することを考える。画像は画素データ RGB の組み合わせで構成されているた

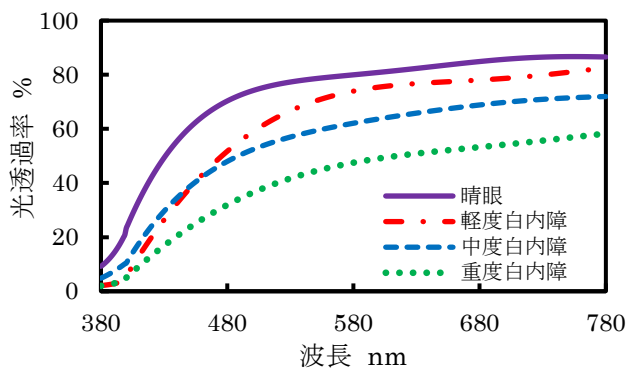


図 1 晴眼と白内障水晶体の分光透過率曲線^[6]

Fig. 1 Spectral transmittance curve of human lenses (transparent and opacity)

め、色覚模擬画像を出力するためには RGB 値を操作しなくてはならない。これより、図 1 の分光透過率と CIE 1931 RGB 等色関数から、式(1)～(3)にて^[10]RGB 別の光透過率を算出した。そして、算出した RGB 別の光透過率 T_R, T_G, T_B を画像の画素データ RGB と対応させて乗じれば、分光透過率を適用した画像を得ることができる（図 2(b)）。

$$T_R = \frac{\int_{380}^{780} \tau(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \bar{r}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

$$T_G = \frac{\int_{380}^{780} \tau(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \bar{g}(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

$$T_B = \frac{\int_{380}^{780} \tau(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} \bar{b}(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

$\tau(\lambda)$: 分光透過率

$\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$: RGB 等色関数

T_R, T_G, T_B : RGB 別の光透過率

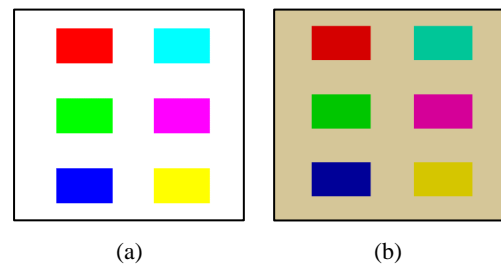


図 2 (a) 原画像, (b) 晴眼の分光透過率適用画像

Fig. 2 (a) Original image, (b) Processed image (Spectral transmittance of transparent lenses)

2.2 相対的な分光透過率

図 1 より晴眼の分光透過率は 100%ではないことは明らかである。したがって、晴眼の分光透過率を適用した画像は低波長領域の光透過率の低下により、すなわち青色領域の減衰により図 2(b)のように黄色くなってしまう。しかし、実際に晴眼者が図 2(a)のシーンを見たときには、図 2(b)のようには見えず、図 2(a)のように見えるだろう。これより網膜以降の視覚系において黄色さを低下させるような何らかの作用がはたらいっているのではないかと推測できる。そこで、晴眼者が図 2(b)ではなく、図 2(a)と視認できるように補正を考えた。これより、晴眼の分光透過率を基準とした各 4 程度の相対分光透過率を定義した（図 3）。このとき、晴眼の相対分光透過率を図 2(a)に適用した場合、全波長において光透過率が 100%であるので、図 2(b)ではなく、図 2(a)がそのまま出力される。

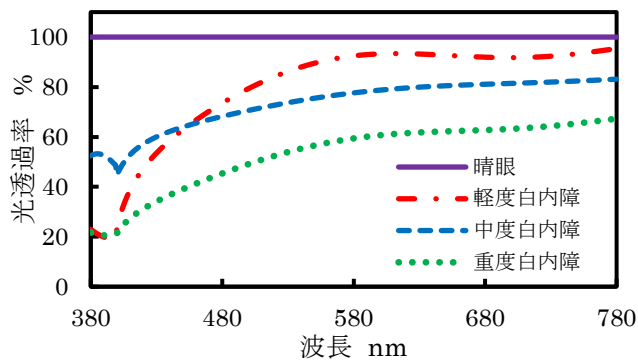


図 3 晴眼の分光透過率を基準とした相対分光透過率曲線
Fig. 3 Relative spectral transmittance curve of human lenses
(transparent and opacity)

2.3 散乱光強度の適用方法

本研究で扱う散乱光強度とは、測定されたヒト水晶体の光散乱程度を、8bit にてデータ化したものである^[6]。光散乱は、水晶体の混濁によって引き起こされるため、光散乱が大きいということは、混濁が強いといえる。また、混濁はたんぱく質変性によって引き起こされ、ミー散乱を誘発する。ミー散乱とは光が光の波長と同程度かそれ以上の大きさの粒子に衝突することによって引き起こされる現象で、すべての波長が様に散乱するために白色光が生じる。白内障者はこれによって白みを感じる。そこで本研究では、散乱光強度と白みの程度を関連づけ、白画像により白みを表現することを試みた。

Nishimoto ら^[6]は 30 眼を対象に散乱光強度と分光透過率を対応させた式(4)。両者の間には、相関係数で-0.804 と高い負の相関関係がみられた。

$$y = 104.0 - 0.260x \quad (4)$$

y: 散乱光強度, x: 平均透過率

まず、散乱光強度を白画像に適用することを考える。散乱光強度は、図 1 の各 4 程度から平均透過率を算出し、式(4)に適用することによって得た (表 1)。前述のように 8bit にてデータ化されているため、0-1 の範囲に正規化できる。また、デジタル画像では、不透明度情報 α が 0-1 の範囲で設定でき (0 は完全透明, 1 は完全不透明)、背景画像と前景画像との合成をなめらかするときに用いられる。したがって、散乱光強度を 0-1 に正規化すれば、不透明度 α として扱うことができる。これより、白みを表現したい原画像に散乱光強度 (不透明度 α) で強弱をつけた白画像を合成することによって、白内障者が感じる白みを表現する。図 4(b)は、晴眼の散乱光強度を適用した白画像を図 4(a)に合成した画像である。分光透過率と同様に、晴眼者は図 4(b)のように白みがかって見えるわけではない。これより、各 4 程度の散乱光強度値から晴眼の散乱光強度値を差し引くことによって、晴眼を基準

とした相対散乱光強度を定義した (表 1)。このとき、晴眼の相対散乱光強度を白画像に適用し、図 4(a)と合成した場合、晴眼の相対散乱光強度は 0 (不透明度 $\alpha = 0$) であるから、図 4(a)がそのまま出力される。

表 1 散乱光強度値と晴眼基準の相対散乱光強度値
Table 1 Scattering light intensity and Relative scattering light intensity based on transparent lenses

各 4 程度	散乱光強度	相対散乱光強度
晴眼	119	0
軽度	164	45
中度	189	70
重度	245	126

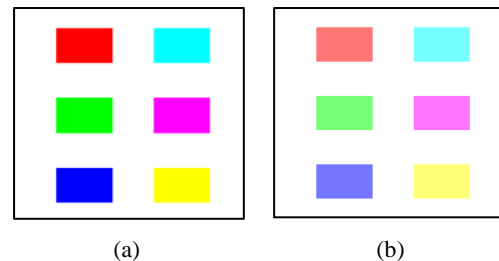


図 4 (a) 原画像, (b) 晴眼の散乱光強度適用画像
Fig. 4 (a) Original image, (b) Processed image (scattering light intensity of transparent lenses)

3. 白内障色覚模擬画像の出力

前章で算出した 2 つの相対的なパラメータを使用し、式(5)により白内障色覚模擬画像を出力する。 C_i , O_i , W_i は RGB の 3 成分ごとの 2 次元配列が組み合わさった画像データである。RGB 別の相対光透過率 T_i は、相対分光透過率 $\tau(\lambda)$ を式(1)~(3)に適用することによって算出した。式(5)は、色覚を模擬したい原画像に相対分光透過率を適用し、相対散乱光強度 (不透明度 α) で操作した白画像を合成することを意味する。一例として、中度白内障者の色覚模擬画像を図 5(a)に示す。

$$C_i = (1 - \alpha) \times T_i' \times O_i + \alpha \times W_i \quad (5)$$

C_i : 白内障色覚模擬画像 ($i = R, G, B$)

O_i : 原画像 ($i = R, G, B$)

W_i : 白画像 ($i = R, G, B$)

T_i : RGB 別の相対光透過率 ($i = R, G, B$)

α : 不透明度

4. 結果と考察

分光透過率と散乱光強度を晴眼基準とすることによって、各 4 程度における相対的な値を算出し、網膜以降の視覚系による何らかの補償作用を想定した。これにより、分光透過率の適用による黄色みや明るさの低下を低減さ

せ、散乱光強度においても白みの強調を抑えることができた。そして、両相対的なパラメータを画像に適用することによって、図 5(a)に示すような白内障者の色覚を模擬した画像を得られた。

図 5(b)は、中度の相対分光透過率のみを原画像に適用した結果である。また、図 6 は原画像、図 5(a)、図 5(b)中の 6 色（赤、緑、青、シアン、マゼンタ、イエロー）の彩度 S を比較した結果である。彩度 S は、HSV 表色系における S であり、各 6 色の RGB 値を算出した後に、 $S = (\max(R, G, B) - \min(R, G, B)) / 255$ に適用して得た。例えば、原画像の赤ならば $(R, G, B) = (255, 0, 0)$ 、シアンならば $(R, G, B) = (0, 255, 255)$ であり、原画像における $\max(R, G, B)$ は 255、 $\min(R, G, B)$ は 0 と固定であるから、原画像中の 6 色の彩度 S は全て 1 となる。一方で、図 5(a)の 6 色における彩度 S はおよそ 0.6、図 5(b)においてはおよそ 0.8 となった。これより、相対分光透過率のみの適用でも彩度 S は低下するが、加えて相対散乱光強度を適用するとより彩度 S が低下することがわかる。文献[4]では、色フィルタよりもかすみフィルタが対象物の色の彩度低下に寄与したと報告している。この報告と相対散乱光強度を適用するとより彩度が低下したこと（図 6）は同じ傾向を示している。これは、色覚表現に相対散乱光強度を適用することの妥当性をうかがわせる。また、文献[5]においても白内障者に則したものではないが、高齢者擬似体験フィルタ装着時には彩度が低下したと報告しており、これも図 6 の結果と同じ傾向を示している。しかしながら、本白内障色覚表現法の妥当性を検証するためには、晴眼者と白内障者を対象とした評価実験を構築し、得られたデータを比較して定量的に評価する必要がある。

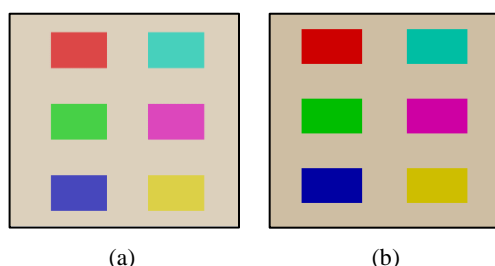


図 5 (a) 2つの相対パラメータ適用画像（中度）、(b) 相対分光透過率のみ適用画像（中度）

Fig. 5 (a) Processed image (Relative spectral transmittance and relative scattering light intensity (moderate)), (b) Processed image (Only relative spectral transmittance (moderate))

5. おわりに

分光透過率と散乱光強度の 2 つの医学的パラメータに基づいた画像処理による白内障者の色覚表現法を検討した。これにより、白内障者が知覚する明るさと色をデジタル画像上で表現可能とした。表現結果は、先行研究結

果との類似点はあるものの、今後は白内障者などを対象に評価実験を行い、妥当性を検証することが課題である。本研究の一部は、名城大学総合研究所平成 25 年度学術研究奨励助成制度の支援を受けて行われた。関係各位に感謝の意を表す。

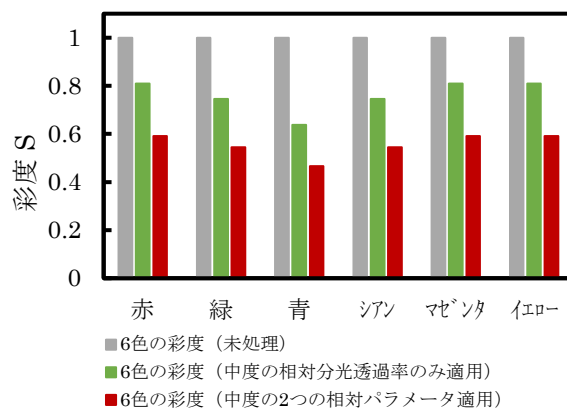


図 6 6色における色覚表現前後での彩度 S 比較
Fig. 6 Comparison of saturation in six colors

参考文献

- [1] 総務省：統計トピックス No. 90, 高齢者の人口 <http://www.stat.go.jp/data/topics/topi901.htm>
- [2] 最新鋭白内障手術, 眼科先進医療研究会編, リケージワークス, (2015)
- [3] 茨城, 佐々木：白内障手術適応に関するアンケート調査, 日眼誌, Vol.117, No.7, pp.541-547(2013)
- [4] 小浜, 池田, 久住, 篠田：白内障擬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)
- [5] 岡嶋, 高瀬：マンセル色票の色名呼称における高齢者水晶体擬似体験フィルタの装着の効果, 照明学会誌, Vol. 84, No. 11, pp.838-842(2000)
- [6] Nishimoto, Sasaki：In vivo Light Scattering Intensity in the Lens versus in vitro Spectral Transmission in the Nuclear Region, Ophthalmic Research, Vol. 27, No. 1, pp.1-11(1995)
- [7] 佐々木, 柴田, 尾羽沢, 藤原, 小暮, 小原, 糸井, 加藤, 秋山, 奥山：白内障分類試案, 日眼誌, Vol. 93, No. 7, pp.796-800(1989)
- [8] 宇治：ヒト水晶体の可視光吸収が ERG に及ぼす影響-第 1 報-水晶体の波長別吸収スペクトルについて, 日眼誌, Vol. 79, No. 9, pp.1154-1162(1975)
- [9] 坂本：水晶体の光透過特性, 視覚の科学, Vol. 15, No. 4, pp.198-205(1994)
- [10] 尊田, 樋口, 三箇山, 大柿：画像処理技術を利用した反射・透過映像の高速生成, 情報処理学会研究報告, Vol. 93, No. 110, pp.33-40(1993)