

<研究課題> 分光分布の違いが高齢者の視覚的効果へもたらす影響に関する研究

代表研究者 奈良女子大学大学院生活環境科学系生活健康学領域 助教 鍵本 明里

【抄録】

分光分布が異なることで、網膜にある光感受性細胞が刺激される量が増えるため、色や明るさなどをヒトは異なって知覚する。近年では、網膜神経節細胞であるメラノプシン細胞が視知覚へ与える影響について報告されているが、これまで主として若年者を対象として検討が行われてきた。しかし、ヒトの眼は加齢に伴って変化するため、加齢に伴うメラノプシン細胞による視知覚の変化を把握することが求められる。そこで本研究では、メラノプシン細胞が与える視知覚について、明るさの知覚および色の知覚について若年者および高齢者について検討を行った。その結果、若年者はメラノプシンの刺激量によって明るさの知覚に違いが見られたものの、高齢者では違いはみられなかった。また、色の知覚については相関色温度が 5000K の環境下においては年齢によって異なる知覚をもたらす可能性が示された。

1. 研究の目的

近年、省エネルギー化に伴い、LED 照明が普及している。LED 照明の利点として、従来光源の蛍光灯等と比べ、分光分布を容易に変えることが可能であることが挙げられる。

一方、2000 年ごろに、光感受性網膜神経節細胞（以下、メラノプシン細胞）が発見された（Berson, 2002）。メラノプシン細胞は、480 nm 付近にピークの感度を持ち、従来の視細胞である 3 種の錐体とは異なる感度特性を有している。

ヒトは、眼に入射する光の分光分布と網膜上にある視細胞の分光感度との積分値の相対比率によって色や明るさを知覚するため、光の分光分布が異なると、色や明るさの知覚に影響をもたらす。近年では、視細胞に加えてメラノプシン細胞も視覚的な作用に寄与していることが多数報告されている（Brown et al., 2012, Yamakawa et al. 2019, Kagimoto & Okajima, 2020）。しかし、メラノプシンが視知覚に与える影響についてこれまでなされてきた研究は、いずれも若年者を対象とした研究である。ヒトの眼は、加齢に伴って水晶体が白濁するなどの変化があるため、加齢に伴う視知覚の変化を把握することは、照明環境へ応用するうえで重要である。そこで本研究では、まず、光の分光分布を、とくにメラノプシン細胞の刺激量に着目して変化させた際の明るさの知覚の変化を把握することを目的とし、若年者および高齢者を対象とした心理物理実験を実施した。

また、メラノプシンの刺激量が異なる照明環境下における色の知覚の違いを検証するため、水晶体の加齢変化を考慮した、各視細胞の分光感度を用いて、色の知覚にどのような違いが生まれるのかを理論的に検証した。

2. 研究方法と経過

2-1 分光分布の違いが明るさの知覚に与える影響の加齢効果

2-1-1 光刺激の作製

光刺激は、Silent-Substitution 法 (O. Estévez, 1982) (以下、SS 法) を用いて作製した。この方法によって、2 種以上の光刺激があるときに、メラノプシン細胞の刺激量のみが変わるように分光分布を操作し、各光刺激に対する心理的応答を得ることで、メラノプシン細胞による影響を解析可能となる。

本研究では、主波長の異なる 12 種の砲弾型 LED と Arduino Uno R3、LED ドライバ (TLC5940) を用いて、各 LED の出力を単独で操作できる装置を製作し、自作の積分球を通して光を混色させて、実験参加者へ呈示した。また、実験条件を観察できているか確認するため、実験空間内に小型カメラを設置した。

2-1-2 光刺激

輝度に対するメラノプシン細胞の刺激量 (M/P 比) 5 種、および各 M/P 比に対して 5 段階の輝度を設け、計 25 種の光刺激を作製した。光刺激の色度値は、いずれも白色点 ($x_f, y_f = 0.333, 0.333$) とした。M/P 比は、数値が高いほどメラノプシン細胞の刺激量が高いことを意味する。

2-1-3 明るさの知覚の実験方法

実験は暗室内にて行った。光刺激は実験参加者の正面に設けた固視点から偏心度 7° の位置に 2.5° の視角サイズで呈示した。光刺激の周辺は、杆体による影響を避けるため、スチレンボ

ードに白色光を照射し、9 cd/m²に設定した。

実験参加者が暗室に入室後、環境になれるために3分間待機させた後、実験を開始した。1秒間のピープ音が鳴った後、参照光とテスト光を5秒ずつ交互に観察させ、参照光に対して感じた明るさを100としたときの、テスト光に対して感じた明るさを数値で回答させた。なお、参照光は、作製した光刺激の中で、M/P比および輝度が最も高い刺激とした。

2-1-4 瞳孔径の測定

ゴーグルタイプの眼球運動測定装置[Talk Eye Lite/竹井機器工業]を用いて瞳孔径を測定し、網膜に到達する光の量(網膜照度)を算出した。測定手順は、明るさ知覚の実験時と同様であった。

2-1-5 実験参加者

目の手術の経験や目に関する疾患の既往歴がなく、色覚が正常な若年者11名、高齢者11名が実験に参加した。本実験は、奈良女子大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の審査(承認番号24-48, 24-72)を経た後に実施し、参加者全員から書面による同意を得た。実験の実施期間は、2024年10月29日~12月23日であった。

2-2 メラノプシンの刺激量の大小が色の見えに与える影響

メラノプシンの刺激量が異なる分光分布の光の下での色の見えに与える影響を検討するため、先行研究における色の見え予測式を用いて、視対象の分光放射輝度を元に色の見えを予測した。

2-2-1 照明条件

3種の色温度可変白色LED[iW Cove MX PowerCore, カラーキネティクス], R, G, B可変LED[iColor Cove MX PowerCore]を白色のステンボードで覆われた空間の上部に設置して作成した。照明条件は、相関色温度を2条件(3000K, 5000K)、錐体の応答量(S-, M-, L-cone-optic)はほぼ等しいが、メラノプシンの刺激量(Melanopic)が異なる条件を2条件(M/P比が高い条件: Mel_High, M/P比が低い条件: Mel_Low)設定した。表1に照明条件の詳細を記す。分光分布は、演色照度計[CL-70F, コニカミノルタ]を用いて机上水平面にて測定した。

2-2-2 測定方法

各照明条件下において、実験空間内の机上面中央部に100色相配列検査器[ND-100, 日本色研]のコマを1つ配置し、ヒトが観察する状況を想定して、斜め45°の位置から100色相

表1 設定した照明条件

	Mel_Low_3000K	Mel_High_3000K	Mel_Low_5000K	Mel_High_5000K
照度	723.1	701.5	731.5	728.3
S-cone-optic	261.58	254.64	579.13	584.42
M-cone-optic	584.27	588.24	687.2	700.93
L-cone-optic	732.68	726.72	726.32	739.7
Rhodopic	400.3	571.29	637.24	708.72
Melanopic	346.26	534.18	601.44	725.13
相関色温度(K)	2982.6	2744.8	5084.7	5062.5
Duv	0	-0.008	0	0
M/P比	2.8	4.3	4.6	5.5

のコマを分光放射輝度計[CS-2000, コニカミノルタ]を用いて測定した。

3. 研究の成果

3-1 メラノプシンの刺激量による明るさの知覚の加齢効果

高齢者1名のデータが欠損したため、高齢者は10名分のデータを用いて解析した。若年者では、輝度の増加に伴って明るさの知覚が大きくなる傾向が見られたが、M/P比条件では、M/P比が二番目に低い光刺激Dで最も暗く知覚され、M/P比が最も低い光刺激Eで最も明るく知覚される傾向がみられた。(図1)これは、光刺激に対する色の見えが異なって知覚されたことが影響していると考えられる。一方、高齢者は輝度の増加に伴って明るさの知覚が大きくなる傾向が見られたが、M/P比条件間ではほとんど違いがみられなかった。これらの傾向は、瞳孔径のサイズを考慮した、網膜照度に対する明るさの知覚においても同様であった。

3-2 分光分布の違いが色弁別に与える影響

先行研究(DeValois, 1993)のマルチステージカラーモデルに基づき、各照明条件下における100色相のコマに対する色の見えを予測した。Mel-HighとMel-Lowに対する赤、緑、黄、青の知覚量の差を図2に示す。これより、若年者においては、いずれの相関色温度条件においても、メラノプシンの刺激量が高い照明条件下においてやや緑みがかって知覚される可能性が明らかとなった。また、3000Kにおいては青み、5000Kにおいては黄みを帯びる可能性がある。一方、高齢者では3000Kにおいては若年者と同様に、メラノプシンの刺激量が高いと青みを帯び、色相によって赤みや緑みを帯びる傾向が見られたが、5000Kにおいては全色において青みと赤みを帯びる可能性がある

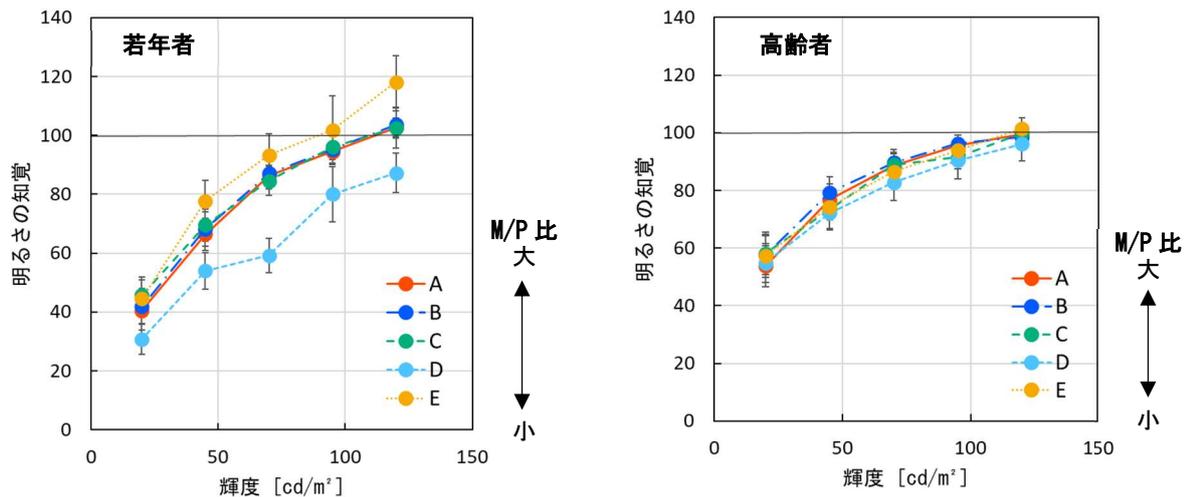


図1 明るさの知覚の評価結果

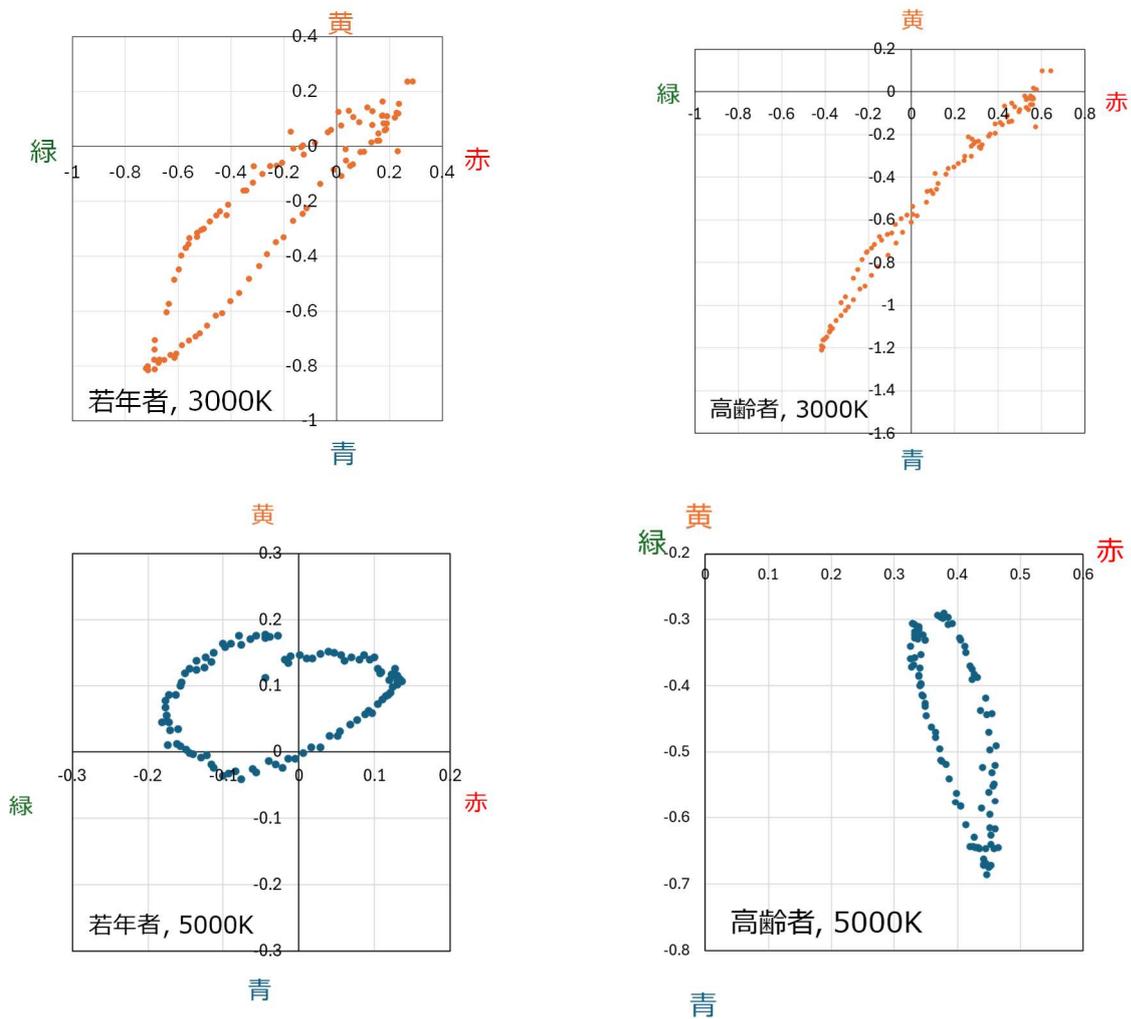


図2 色の知覚の予測結果 (Mel_High と Mel_Low における差)

ことが示された。これは、高齢者は若年者と比較して短波長側の感度が低下するといった波長依存性が関与していると考えられる。

4. 今後の課題

本実験では、各年代の分光感度曲線を使用して検討することができておらず、厳密には錐体の働きが関与している可能性がある。そのため、各年代の分光感度を使用して、同様の実験を実

施することで、錐体による影響を排除して検討することが課題である。また、色の知覚機能について、シミュレーションが正しいのか被験者実験を通して検証する必要がある。

5. 研究成果の公表方法

2026年1月に、日本視覚学会冬季大会（東京）にて発表予定である。

以上

Research on the effects of differences in spectral distribution on the visual effectiveness of the elderly

Primary Researcher: Akari Kagimoto
Assistant Professor, Nara Women's University

The amount of photoreceptor cells in the retina that are stimulated is calculated as the integral of the spectral distribution of lighting and the spectral sensitivity of each photoreceptor cell. Therefore, different spectral distributions result in different color visibility and brightness perception. In recent years, the effects of melanopsin cells, which are retinal ganglion cells, on visual perception have been reported. However, studies have been conducted mainly on young subjects. Since the human eye changes with age, it is necessary to understand the age-related changes in visual perception induced by melanopsin cells. In this study, we investigated the visual perception given by melanopsin cells in terms of brightness perception and color perception in young and elderly subjects. The results showed that the perception of brightness varied with the amount of melanopsin stimulation in the young, but not in the elderly. The results also indicated that the perception of color may differ depending on the age of the subjects in an environment with a correlated color temperature of 5,000 K.