

色恒常性の多段階モデル

A Multi-Stage Color-Constancy Model

岡嶋 克典
高瀬 正典

防衛大学校応用物理学教室
防衛大学校応用物理学教室

Katsunori Okajima
Masanori Takase

1. はじめに

今回、我々は水晶体加齢モデルに基づく高齢者の水晶体擬似フィルタを作製し、若年者でこのフィルタを装着した時と装着しない場合で基本色の色名呼称法を用いて色の見えを測定した結果、定性的に大きな違いが見られないことを示した¹⁾。この結果は、これまでの高齢者の色の見えの研究結果や日常的な実例と傾向が一致しており、水晶体の加齢変化だけでは色の見えが大きく変わる事態は生じないことが示されたわけである。

しかしながら、水晶体の加齢変化により、高齢者の網膜に到達する光の分光特性が若年者に比べて変化していることは理論的にも明らかであることから、本結果は測色学的見地からすぐに納得できるものではない。すなわち、測色学だけではなく、生理学的或いは知覚的な効果によって、結果的に色の見えが変化しないと考える必要がある。

我々は以前、水晶体加齢モデルを用いて、若年者に対して高齢者のD65白色をCRTディスプレイに擬似的に呈示し、色順応の効果を実験的に検討した。その結果、色順応だけでは高齢者の色の見えの恒常性を説明できないことを示し、何らかの神経的な補償作用が存在することを示唆した²⁾。

今回行なった水晶体擬似フィルタを使った実験では、被験者は30分間事前にメガネを装着しただけであり、この間に色覚の神経回路自体が変化したとは考えにくい。実際、実験後にメガネをはずした瞬間は奇妙な色の見え方となるが、すぐに元に戻るといった内観も得られている。そこで、今回の結果をいわゆる「色恒常性の問題」の枠組みで考察することを試みた。

2. 色恒常性:測定法の違いと低次メカニズムの関与

一般に「色恒常性」とは、照明環境に依らず、常に物体本来の色を知覚・認識できる特性を指す言葉として用いられている。しかし、色恒常性にも様々なレベル・定義が存在することも事実である。よく知られているのは、「見かけの色(appearance color)」と「物体固有の表面としての色(surface color)」という、色知覚の二面性である³⁾。どちらの基準で、色を合わせるかで、色恒常性の評価も異なることが知られている。見かけ

の色で色合わせすることをAppearance (Color) Matching(以下AM)といい、表面の色として色合わせすることをSurface (Color) Matching(以下SM)という。一般に、SMの方がAMよりも、色恒常性が成立しやすいと言われている。また、テスト色の色変化を測定する手法として、このようなカラーマッチング法以外にも、カラーネーミング法を用いた方法がある。カラーネーミング法にも、反対色成分の細かい色配分を応答する「エレメンタル・カラースケーリング」と、大雑把に11の基本色名のいずれかに割り振る「カテゴリーカル・カラーネーミング」があり、後者の方が色恒常性が強く反映されるのは、カテゴリー化の特性上、明らかである。

また、色恒常性メカニズムの要素として、一般に色順応(Color Adaptation)と色対比(Color Contrast)が考えられる。色順応は、主に錐体レベルでのゲインコントロールに相当し、非常に簡潔な構造を持つvon Kriesモデルでかなり精度良く現象を説明できることが分かっている⁴⁾。一方、色対比が錐体レベルで生じているのか、反対色レベル以降なのかは未だ明らかではない⁵⁾が、見かけの効果は色順応と同様であり、色恒常性に大きく寄与していることは間違いない。

3. 色恒常性と色透過性の数学的構造の類似性

前述のAMとSMの違いは、人間は意識によって色の見方を変えられる能力があることを示しており、色恒常性現象における高次レベルの認識作用の関与が示唆される。定性的に、AMは

(見かけの色) = (表面固有の色) + (照明の色)
の判定であり、SMは

(表面固有の色) = (見かけの色) - (照明の色)
の判定と考えることができる。この関係からも、SMの方が色恒常性が強く反映される。また、この二面性は、空間的に同じ場所に2種類の色判定が可能であることを意味しており、「透過色(あるいは透明色)」の知覚と類似する点が多い。すなわち、「色恒常性」の文脈における「照明光を含んだ」見かけの色と「照明光を取り去った」表面の色の違いは、透過色知覚における透過部分を「単に部分としての色」として判断するか「重なり合った2つの色」として判断するかの違いに相当する。実際、透過色(特に色フィルタを通して見た

状況)と色恒常性を定式化すると、図1と図2に示した式の積可換性から物理的に等価であることが分かる。

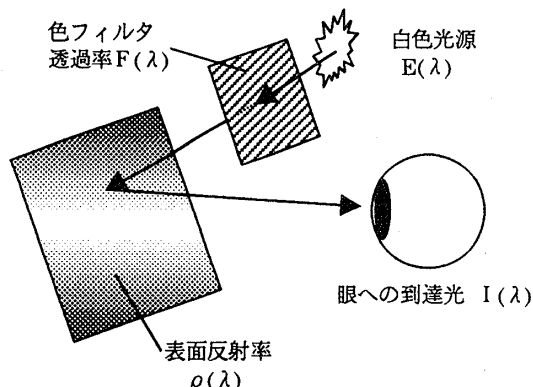


図1 色恒常性の定式化 $I(\lambda) = \rho(\lambda) \cdot F(\lambda) \cdot E(\lambda)$

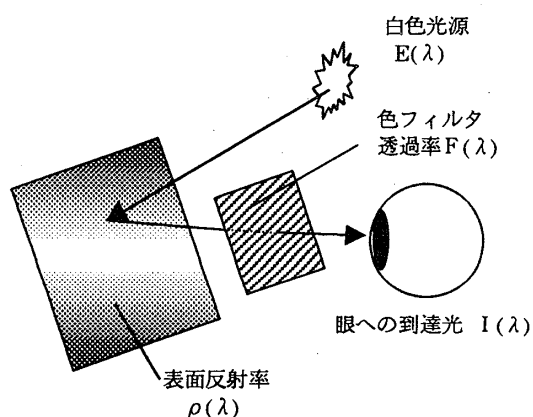


図2 色透過性の定式化 $I(\lambda) = F(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot E(\lambda)$

すなわち、色恒常性も色透過性も数学的には $F(\lambda)$ と $\rho(\lambda)$ を分離して解くことに対応する。実際は、人間が分光特性を直接解いているわけではなく、錐体あるいは反対色レベルでの解を求めていると推測される。

4. 色恒常性の多段階モデル

AMの結果には、錐体レベルの色順応効果に加えて空間的色対比効果が反映される。もし、周辺刺激がなく、テスト刺激単体の場合には色順応のみが関与し、周辺刺激があればさらに色対比の効果が加わる。そのため、周辺刺激がある条件、特に複雑刺激(モンドリアン図形等)の時の方が色恒常性が強い。今、ある照明環境に充分順応していると仮定する。照明光に対する錐体応答量を (L_0, M_0, S_0) 、テスト刺激に対する暗順応時の錐体応答量を (L, M, S) とすると、この照明環境に順応している時のテスト刺激に対する実際の錐体応答量 (L', M', S') は、von Kriesモデルを適用すると、 a, b, c を比例定数として、

$$L' = a \cdot L / L_0, \quad M' = b \cdot M / M_0, \quad S' = c \cdot S / S_0$$

と定式化できる。周辺光に対する錐体応答量を (L_s, M_s, S_s) とし、空間的対比効果が順応効果と同様な作

用をもたらすとすれば、

$L' = a \cdot L / (L_0 + L_s), \quad M' = b \cdot M / (M_0 + M_s), \quad S' = c \cdot S / (S_0 + S_s)$ と記述できる。周辺刺激が白色物体の場合、 (L_s, M_s, S_s) と (L_0, M_0, S_0) の各成分の比はほぼ等しくなるため(この比を k とする)、順応効果の増大と等価的に働く。

あるいは、色対比が錐体のゲイン調節ではなく、抑制的(引き算的)に働く場合には、

$L' = a \cdot (L - L_s) / L_0, \quad M' = b \cdot (M - M_s) / M_0, \quad S' = c \cdot (S - S_s) / S_0$ と定式化でき、周辺刺激が白色物体の場合には、

$L' = a \cdot L / L_0 - k, \quad M' = b \cdot M / M_0 - k, \quad S' = c \cdot S / S_0 - k$ のような形となる。この2つの仮説の違いは、

$$\begin{bmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a/L_0 & 0 & 0 \\ 0 & b/M_0 & 0 \\ 0 & 0 & c/S_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}$$

のように行列形式で記述した際、 $[k_i]$ の項が零か否か、すなわちLinear変換かAffine変換の違いに相当し⁶⁾、どちらで実験結果を説明できるかで検証可能である。

SMの場合、色順応と色対比の処理後に、「どのような色フィルタを通して見ているのか」を推定し、その仮想色フィルタを除去する機能が備わっていると考えられる。この機能は比較的高次レベルの処理と考えられ、反対色レベル以降に色の何らかの心理的「引き算」が行なわれていると推測される。或いは、色対比と同様な演算で説明できる可能性もある。

4. 結論

以上のことをまとめると、色恒常性における階層性を表1のように整理することができる。

色の見え	処理過程	処理機構
Appearance Color	照明環境に色順応	錐体レベル
	空間的な色対比効果	
Surface Color	仮想色フィルタの除去	反対色レベル
		高次レベル

表1 色恒常性の階層過程

今回述べた色恒常性の多段階モデルは、今のところ、これまでの膨大な研究結果から推定した仮説に過ぎない。今後は、適切な手法を用いて、実験的に当モデルの検証ならびに修正を行なっていく必要がある。

参考文献

- 1) 日本色彩学会誌, 23-Suppl., (1999)
- 2) 日本色彩学会誌, 22-Suppl., pp.16-17 (1998)
- 3) JOSA, A,3, pp.1743-1751 (1986)
- 4) JOSA, A,9, pp.1433-1448 (1992)
- 5) Nature, 349, pp.235-238 (1991)
- 6) Vision Res., 39-8, pp.1531-1550 (1999)