

## 色順応による白色点の移動の照明光による違い

栗木一郎・内川恵二

東京工業大学 工学部 像情報工学研究施設

〒226 横浜市緑区長津田町 4259

### 1. はじめに

環境の照明光が変化したとき、視覚系は新たな照明光に対して順応する。このことは、視環境に変化が生じたときに、同じ物体に対する色知覚が大きく変化しないという現象である色恒常性を高めるように作用している。

自分のいる環境の照明光が太陽光から白熱電球の黄色味を帯びた光に変化したときの白い紙の色の見えについて考えてみる。白色の紙から反射される光は照明光の変化を反映し、色度が黄色の方向にシフトする。同時に視覚系において照明光に順応する感度変化が起こり、黄色成分に対する感度が下がれば、順応後の色の見えは測色値から予想される見えより白っぽくなり、白色照明下の色の見えに近づく。このように、視覚系の順応は色恒常性の一部を担っているといえる。

ところで白熱電球下で白い紙を観察しているときに注意深く観察をすると、白色の紙であるという知覚の一方で、見た目の色は完全な白色ではなく僅かに黄色みを帯びていることに気づく。もしも視覚系が照明光に完全に順応し、照明光の色そのものが完全な白色に見えるように感度に変化していれば、白熱電球下の白色の紙は見た目にも白色になるはずであるが、実際はそうではない。このことは視覚系の順応が必ずしも完全に照明光の変化分を除去できない可能性を示している。

では、色順応によってどこまで色恒常性に近い色の見えを回復することができるのだろうか？また、日常的な照明光の変化は青-白-黄色方向に分布しているが、それと直交する緑-白-

紫方向に照明光が変化した場合でも同様の効果が認められるだろうか？本研究の目的はこの疑問に対する答を出すことである。

### 2. 方法

#### 2.1 実験原理

視覚系の順応を測定する方法として、本研究ではユニーク白色測定を用いた<sup>2)</sup>。視覚系がある順応状態のときに、被験者に赤み、緑み、青み、黄色みといった色味が一切感じられないように刺激の色を調整させ、刺激の色度を測定することによって視覚系の感度変化を測定する方法である。この方法の原理はユニーク黄色を用いて視覚系の順応時の感度変化を測定するのと同様であり、その方法の利点は、ユニーク白色知覚が安定していることと、参照刺激を呈示する必要がない、ということである<sup>2)</sup>。

従来の研究でマクスウェル視光学系やコンピュータディスプレイを用いていたものは、視野がたかだか 20 deg 程度と小さく、中心窩付近の色の見えがさらに周辺視野に呈示された光によって影響を受ける可能性は否定できない。加えて、我々が日常経験する照明光は、むしろ我々はその照明環境の中に入り込んでいるという状態がほとんどである。このような状況を実験室的に実現するため、連続的に色度点に変化する照明光を設置した被験者ブースを持つ実験装置を作り、実験を行った。

#### 2.2 装置

180 cm 立方の部屋の天井に照明光を設置し、被験者の正面の壁には 5 cm × 5 cm の開口を開け、その壁の背後に CRT ディスプレイを設置した。室内の壁は N5 とほぼ等しい明度の灰色に

塗られている。照明光は  $D_{65}$  模擬蛍光灯 (40W × 5本) と青, 黄, 緑, 紫の色補正フィルタと NDフィルタの組み合わせからなっている。色フィルタの一つと NDフィルタが一つの組になり, その面積比で照明光の色度点が照度一定で白色から青, 黄, 緑, または紫に連続的に変化するようになっている。実験に用いた照明光の色度点は白色 ( $D_{65}$ ) と各フィルタの最大色度の間の5段階で, 照度は被験者の手元で約 200 lx である。

### 2.3 刺激

刺激呈示用の CRT モニタは開口のある壁面から 20 cm ほど奥に設置され, 天井からの照明光が開口を通過して下へ逃げるようになっている。これによって CRT の管面反射は除去され, 照明光の影響を受けない様な刺激の呈示を実現している。CRT は分光放射輝度計を用いて精密に校正され, Macintosh II コンピュータによって制御される。CRT 上に呈示する図形は画面全体が一様な色を持つもので, 被験者は手元のキーボードで刺激の色度を変化させる。被験者は灰色の壁にあいた開口を通して呈示された様な刺激の中心付近を観察することで, あたかも 5 cm × 5 cm の色度可変の反射表面が壁面に付着しているような知覚を得る (表面色モード)。視距離は約 1 m, マッチング刺激の大きさは視角で 2.8 deg × 2.8 deg であった。

### 2.4 被験者・手続き

被験者は 3 名, うち 1 名は青-白-黄色方向のみの実験を行った。被験者の課題は, 周囲の壁の見えに関係なく, 自分が全く色味を感じないユニーク白色の見えになるように刺激の色を調整する, というものである。被験者が操作する刺激は等輝度平面上を変化するが, 若干の輝度の補正も必要に応じて行うことが許された。結果としては被験者はほとんど輝度を操作しなかった。被験者は照明光が変化する度に照明光に 5 分間予備順応し, マッチングをはじめ。刺激は常時点灯されているが, 調整を行う過程で被験者は 5 ~ 6 秒毎に視点を動かすように指示されている。1 セッションを通した照明光の色相方向は一定だが, 色度はランダムに変化さ

せられた。被験者 IK と KS については 20 分の暗順応後の測定も行った。各順応条件に対して 15 試行を行い, その平均を取った。

## 3. 結果・解析

### 3.1 実験結果

図 1 は 3 名の被験者の結果を  $u'v'$  色度図上に表したものである。白い十字は暗順応時の白色点を表している。黒シンボルが照明光の色度点, 白シンボルがマッチング結果の平均を表しており, シンボルの形の違いは照明光の変化に用いたフィルタの違いを表している。± 1 SD はシンボルの大きさにほぼ等しい。視覚系が完全に照明光に順応し, 照明光の下で観察した白色の表面 (完全反射面) の色の見えが白色になるとき, 白シンボルが黒シンボルと重なる。図が煩雑なため, 詳細な検討は解析結果をもとに行うことにするが, いずれの被験者の結果においても, 黒シンボルの分布する範囲に比べ, 白シンボルの分布する範囲が小さい。これは, 今回実験に用いた範囲の照明光に対し, 視覚系はその色味を完全に除去できるほど感度に変化していないことを示している。

### 3.2 解析

この実験結果を暗順応時の白色点を原点とした  $u'v'$  空間上での距離によって解析する。暗順応時の白色 (図 1 の + シンボル) は, 視覚系の順応が完全でないものと考え, ここを原点にとる。暗順応時の白色から照明光の色度点 (黒シンボル) までの距離を横軸, 対応するマッチング結果の色度点 (白シンボル) までの距離を縦軸にとってプロットしたのが図 2 である。視覚系が完全に照明光に順応し, 照明光の変化分を除去できているならばシンボルは傾き 1 の点線の上ののるはずである。しかし, IK, KS のいずれの被験者の結果も傾きは 1 よりも小さく, 0.5 ~ 0.7 であることがわかる。このことは照明光に対する順応が不完全であることを示している。いずれの被験者に関しても, 照明光の色相に対して傾きが多少変化し, 一見, 順応の程度が照明光に依存するよう見える。

さらに, Smith and Pokorny (1975) <sup>9)</sup> の cone

fundamentals を用い、すべての輝度と色度を錐体  
 応答に換算して解析してみる。ユニーク白色は測  
 定の時点の視覚系の中の色メカニズムの応答を中  
 立にする刺激であり、同時に三錐体の応答が等し  
 いと考える<sup>9)</sup>。ところで実験結果は、順応状態の  
 変化によって白色の見えを与える色度が暗順応時  
 に比べてシフトすることを示している。これは、  
 暗順応時の視覚系の感度のままでは、ある照明光  
 下のユニーク白色マッチング結果を視覚系に入力  
 しても色メカニズムの応答が中立にならないこと  
 を示している。そこで、順応状態の変化と平行し  
 て視覚系で何らかの感度調整が行われており、こ  
 の感度調整を経由するとユニーク白色によって生  
 ずる色メカニズムの応答が中立になると考えれば  
 よい。この感度調整をできるだけ簡単に記述する  
 ため、暗順応時のユニーク白色に対する錐体応答

を基準として錐体応答に von Kries 型の係数<sup>10)</sup>によ  
 るスケーリングが行われていると仮定する。つま  
 り、色メカニズムの応答が中立になるのは三錐体  
 の応答が等しくなるのと等価であることになる。  
 この係数によって改めて結果を評価する。

実際には、被験者毎に暗順応時の白色に対する  
 三錐体の応答が等しくなるように予め錐体感度を  
 規格化した後、すべてのユニーク白色マッチング  
 結果に対してL, M, S-錐体の応答が等しくなるよ  
 うな係数  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  を次式に基づいて計算する。

$$L' = \alpha L, M' = \beta M, S' = \gamma S; \text{ s.t. } L' = M' = S'$$

L, M, S は感度変化前, L', M', S' は感度変化後の三  
 錐体の応答を表している。

ここで、M-錐体に対する係数  $\beta$  を 1 に固定し、  
 $\alpha$  と  $\gamma$  の変化を観察する。図 2 と同様に、照明光  
 の色度点を入力としたときに三錐体の応答が等し  
 くなる  $\alpha$ ,  $\gamma$  を横軸、マッチング結果に対する  
 $\alpha$ ,  $\gamma$  を縦軸にとってプロットしたのが図 3 であ  
 る。視覚系が感度調整によって完全に照明光の変  
 化をキャンセルすれば傾き 1 の直線にシンボルが  
 のることが期待される。黒シンボルは青-白-黄方  
 向、白シンボルは緑-白-紫方向の照明光の変化を  
 示している。いずれの被験者の結果も傾きは 1 よ

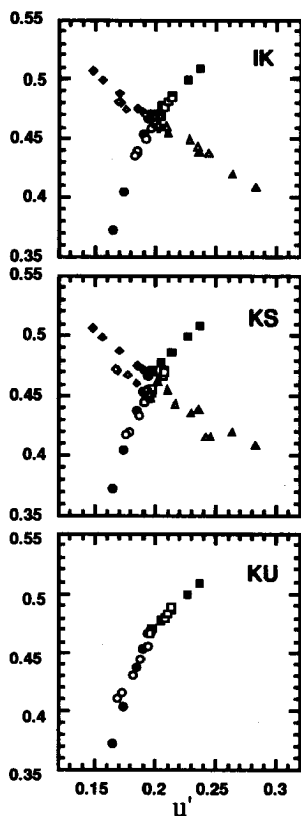


図 1 マッチング結果を  $u'v'$  色度図上に  
 示したもの。黒シンボルが照明光  
 の色度点、白シンボルがマッチ  
 ング結果を表している。IK と KS の  
 パネルにある白い十字は完全暗順  
 応時の白色点を表している。

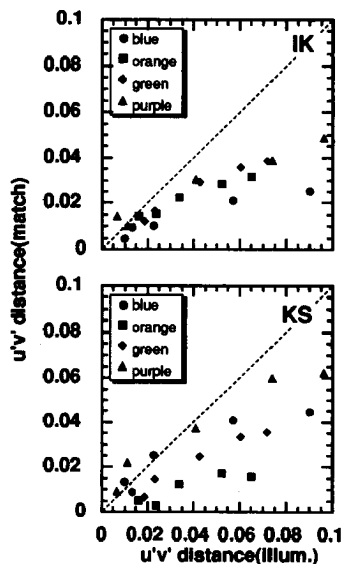


図 2 図 1 の結果を暗順応時の  
 白色点からの距離として  
 評価したもの。横軸が照  
 明光の距離、縦軸が対応  
 するユニーク白色の距離  
 を示している。本文参照。

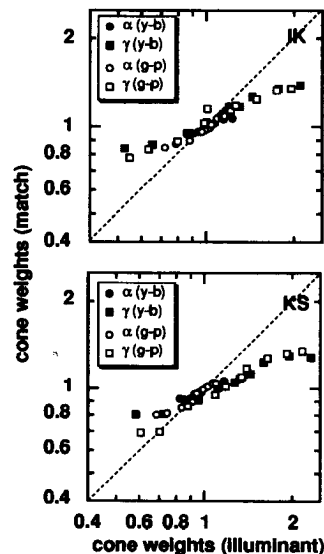


図 3 照明光の変化方向別に von  
 Kries 係数を表したもの。横  
 軸が照明光に対する係数、  
 縦軸がマッチしたユニーク  
 白色に対する係数である。  
 本文参照。

りも小さく、中心付近で約0.5の傾きをもっている。シンボルの軌跡は、グラフの両端付近でやや頭打ちになる形のカーブを描いている。被験者間での差は図2ほど顕著ではなく、またシンボル間の差、すなわち照明光の色相間による差も小さい。以上のことから、照明光に対する不完全な順応は比較的低次の視覚情報処理レベルで生じている現象であると推察できる。

## 4. 考察・結論

### 4.1 考察

今回の実験では、マッチング刺激に隣接する領域が照明光の変化により有彩色になるため、色順応に加えて同時対比の効果も含まれていると考えられる。そこで同時対比の効果が実験結果に対してどのような効果を及ぼすかを検討してみる。刺激に隣接する壁面の色度は照明光の色度とほぼ同じであるから、同時対比はマッチング刺激の色の見えがユニーク白色をはさんで照明光と反対の色になるように作用する。これを打ち消すために、被験者はユニーク白色が照明光の色度に近づくように調整する。いま、マッチング結果には同時対比の効果も除去したうえでユニーク白色に見えるような調整も含まれているから、同時対比の効果が無い時に比べてマッチング結果は完全な色順応の方向に近づくことになる。以上から、同時対比の寄与を含めたとしても、白色点のシフトは照明光変化のたかだか50~70%程度であり、同時対比を除去すればもっと白色点のシフトは減ることになる。この同時対比の寄与については刺激に隣接する領域を暗黒にするなどして実際に測定する必要があると考えている。

解析で錐体応答を用いたことの目的は、新たなモデルによって順応後の色の見えを記述することよりも、 $u^*v^*$ 色度図において評価すると個人差や照明光の色相による差が見られた実験結果を、統一的に説明することにあつた。今回の解析では、von Kries型の係数を乗算する感度調整を想定したが、この仮定は順応が錐体レベルで起こっているという考えを反映しているのではない。順応による感度調整が錐体より

後段に存在し、各錐体の信号を独立に調整する何らかのメカニズムによって生じているとしても、それを包含するメカニズム全体が線形システムであれば、順応に伴って生じる感度調整の操作は各錐体応答に対してなされる係数掛けと等価である。しかし、順応後の色の見えを正確に予測するには、非線形性を導入する必要があることが<sup>7)</sup>わかっている。実際、実験結果は錐体の係数は値の大きな所で頭打ちになる非線形性を示し(図3)、白色の見えを合わせるだけでも線形モデルは不十分であることが確認された。

### 4.2 結論

本研究の結果から、照明光に対する視覚系の順応は不完全であり、完全に照明光の色味成分を除去するには到らないことが分かった。また、この不完全な順応は照明光の色相に関係なく生じることがわかった。

## 文 献

- 1) 栗木一郎, 内川恵二: 瞬時色恒常性におよぼす周辺刺激と色の見えの判断基準の効果. *照明学会誌*, 79, 3-13, 1995.
- 2) L. Arend: How much does illuminant color affect unattributed colors? *Journal of the Optical Society of America A*, 10, 2134-2147, 1993.
- 3) M. D. Fairchild and P. Lennie: Chromatic adaptation to natural and incandescent illuminants. *Vision Research*, 32, 2077-2085, 1992.
- 4) V. Smith and J. Pokorny: Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Research*, 15, 161-171, 1975.
- 5) J. Walraven and J. S. Werner: The invariance of unique white. *Vision Research*, 31, 2185-2193, 1991.
- 6) J. von Kries: Uber die anomalen trichromatischen Farbensysteme, *Zeitschrift für Sinnesphysiologie*, 19, 63-69, 1899.
- 7) R. W. G. Hunt: A model of colour vision for predicting colour appearance in various viewing conditions. *Colour Research and Application*, 12, 297-314, 1987.
- 8) Y. Nayatani, K. Takahama, H. Sobagaki and K. Hashimoto: Color appearance model and chromatic-adaptation transform, *Colour Research and Application*, 15, 210-221, 1990.