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

非会員 栗 木 一 郎 (東京工業大学)

正会員 内 川 恵 二 (東京工業大学)

The Effects of Surround Stimulus and Color Matching Criterion on Simultaneous Color Constancy

Ichiro Kuriki (Non-member) and Keiji Uchikawa (Member)

Tokyo Institute of Technology, Imaging Science and Engineering Laboratory

ABSTRACT

We made a series of asymmetric color matching experiments between an actual color chip under different illuminant and a CRT simulated color chip, by changing surround, illuminant and matching criteria. The observers were asked to match hue, saturation and luminance of two stimuli at apparent-color match criteria, and were asked to match as if the two stimuli were made of the same surface at surface-color match criteria. At the condition without adaptation, and without any surround, the observer was not able to make surface-color match and the results for apparent-color match were the same with the physical chromaticity of the stimulus. At the same time, the condition with gray surround, we could find a shift in color appearance toward color constancy in both criteria, and at the condition with mondrian surround, the degree of color constancy for apparent-color match were improved by the increase of surround color information. However, at the condition without adaptation, the results for apparent-color match were less complete than the results for surface-color match, in terms of the degree of color constancy. At the condition with 15 minutes of adaptation to the illuminant, the results for apparent-color match achieved almost the same degree of color constancy with the results for surface-color match. Our results imply that the perfect color constancy will be achieved not only by surround stimulus, but also by the adaptation to the illuminant.

KEYWORDS: color constancy, apparent color, surface color, surround, adaptation, mode of color appearance

1. はじめに

色恒常性は日常生活の中でごく自然に生じているものであるが、そのメカニズムは複雑であり、未だ解明されていない点が多い。物体表面の色は、まず照明光が物体表面に入射し、次にその反射光が視覚系の光受容器に感受され、さらに視覚系内で光受容器の応答が情報処理された結果である。ここで、照明光のスペクトルが変化すると仮定すると、物体表面で反射された光のスペクトルも当然変化し、結果として被験者の視覚系の光受容器の応答に変化を引き起こす。また、同様な反射光の変化は照明光のスペクトルが変化しなくても、物体表面の分光反射率が変化しても生じる。したがって、被験者は反射光の変化が生じたのが照明光の変化によるものか、反射表面の変化によるものかは分からない。しかしながら、視覚系がその光受容器の応答の変化のみから、その変化が照明光によるものか、物体表面の変化によるものかが分かり、照明光が変化した場合には、物体の表面の色は変化しないと知覚する。たとえば、白い紙はどのような照明光の下でも“白い”と知覚するという現象である。このような現象を色恒常性と言う²⁾。

異なるスペクトルから同じ物体表面色を知覚する現象は照明光が変化するときだけでなく、物体表面と照明光のなす位置関係が変化することによって物体表面の分光反射率が変化した時にも得られる。一様に塗られた立体に一方向から光が射す時に、ある面の色の变化を陰影(shading)として知覚するが、一方、物体表面は一様に同じ色に塗られているという知覚をも得ている。これも色恒常性の一つの形であると見ることができる³⁾。

近年盛んになっている色恒常性の研究において、前者の照明光変化に対して一定した色知覚を得る問題が主に取り上げられている。この問題に対しては Land の retinex 理論⁴⁾をはじめ、様々なアルゴリズムが提唱されているが、どれも決定的なものではない。その中でこれまでに大きく二つの代表的メカニズムが提唱されている。一つは色順応⁵⁾⁶⁾、一つは同時対比である⁷⁾⁸⁾。色順応は現実的な場面に対応して考えられたメカニズムであるが、瞬時に起こる色恒常性を説明することができない。同時対比によるメカニズムは瞬時的な現象を説明できる一方、色恒常性では単純な色対比以上の色シフトが起こっているという矛盾点を持っている。これらの2つの中で特に同時対比に関連が深い“瞬時的な色恒常性”という現象がそもそもあるのか、という問題提起もなされている¹¹⁾。しかし、これらの過去の研究では色恒常性がそもそもの程度成立するか¹⁾といった問題に対して詳しく調べたものは少な

本研究の一部は平成5年度照明学会全国大会において発表された。

く、色恒常性の特性の記述もまだ不十分な点が多く残されている。

本研究では、瞬時的な色恒常性において、様々な周辺刺激を用いた時に、照明光の変化を打ち消すような色恒常性の成立の度合いがどのように変化してゆくのか、さらに、色の見えを評価する判断基準を見えそのものの色 (apparent color) と表面としての色 (surface color) としたときに違いがあるのかを調べた。さらに、完全な照明光への順応があるときにおいても実験を行ない、結果を比較した。

2. 実験方法

2.1 実験装置および刺激

実験装置の概略は図1の通りである。装置は大きく分けて左側のテスト刺激呈示部と右側の参照刺激呈示部からなっている。テスト刺激としては OSA の均等色尺度を構成する色票 (5cmx5cm) を用い、参照刺激としては CRT にテスト刺激と同じ大きさの図形をシミュレートした物を用いた。被験者はアゴ台にあごをのせ、観察距離は両刺激とも 1.4m である。被験者は手元にあるトラックボールで参照刺激の色度と輝度を変化させてマッチングを行なう。被験者と刺激との間にはタイマー制御のシャッターを設置し、順応時、非順応時ともに両方の刺激を同時に観察することによる相互作用を除去した。シャッター開閉の時間設定は、非順応条件、順応条件で異なり、これについては後述する。

色票によるテスト刺激 (2.2°x2.2°) は色温度変換フィルターを通した2台のスライドプロジェクターによってスポット照明される。照明光として、相関色温度および CIE (1931) xy 色度が下記の6種類を用いた。約 1,000K ((x,y)=(0.661,0.340)), 1,700K: (0.558,0.404), 2,400K: (0.484,0.415), 3,400K: (0.412,0.415), 6,000K: (0.323,0.380), 30,000K: (0.254,0.265)。照明光の照度は N 5 のマンセル色票をテスト刺激の位置に呈示した際に約 20cd/m² になるように調整してある。スポット照明光も、テスト刺激のわきから漏れた光も被験者から直接見えないように遮蔽がなされている。

図2に示すとおり周辺刺激条件は3種類あり、(a) 周辺刺激なし、

図2 刺激

(a) 周辺刺激なし、(b) 灰色周辺刺激、(c) モンドリアン周辺刺激の3条件を示している。モンドリアン周辺刺激に用いた色票は、5R4 12, 5YR5 10, 5Y8 10, 5G5 8, 5RP5 10, 5PB5 10, 10B5 10, 5P5 10 である。テスト刺激以外の周囲は暗黒である。

(b) 灰色周辺刺激、(c) モンドリアン周辺刺激である。灰色周辺刺激 (4.4°x4.4°) はマンセル N 5 色票によって作られており、モンドリアン周辺刺激 (4.4°x4.4°) はマンセル N 5 色票の上に8枚の色の異なる色票 (0.8°x0.8°) をのせて作られている。CRT による参照刺激は、テスト刺激 (テスト色票+周辺刺激) を D₆₅ 照明光で照らした時の反射光の色度点をシミュレートした物であり、被験者は様々な照明光の下でのテスト刺激の見えを D₆₅ 照明光の下でのテスト刺激の見えとして再現することになる。

2.2 実験手続

非順応実験では被験者は右眼単眼で刺激を観察し、シャッターはテスト刺激側で4秒間、参照刺激側で6秒間交互に開閉する。被験者はシャッターが開くのにあわせて交互に視野を換えて刺激を観察しながら参照刺激の見えをテスト刺激の見えにマッチングする。1試行が終わる毎に色票と照明光のフィルターを交換するため両方のシャッターが閉じられ、被験者ブース内にある D₆₅ 蛍光灯が点灯される。被験者は D₆₅ 蛍光灯を点灯した被験者ブースに試行開始前に2分間入り、照明光に順応する。テスト色票は灰色を含む8枚で、色票ごとに6種類の照明条件、3種類の周辺条件を1試行ずつランダムな順序で呈示し、1セッションとした (合計144試行)。各被験者は2種類の判断基準ごとに5セッションの実験を行なった。

順応実験では被験者は顔前におかれた隔壁により、左眼でテスト刺激を、右眼で参照刺激を観察する。被験者はセッション開始前に、左眼でテスト刺激の前面にマンセル N 5 色票を呈示した順応刺激 (7°x10°, 約15cd/m²) を観察し、右眼では CRT の D₆₅ 白色 (7°x10°, 15cd/m²) を15分間観察することによって照明光への順応を行なう。マッチング時は両刺激を同時に観察することによる弊害を防ぐため、両刺激ともに5秒間ずつ交互に開閉するシャッターを通して観察される。順応条件の実験は、色恒常性が成立しやすい条件のモンドリアン周辺刺激のみで行った。非順応条件と異なり、順応時には1セッションを通して照明光は固定され、試行間には両方のシャッターが開放されて順応刺激を呈示することにより、左右眼の順応状態を維持するように考慮した。

2.3 判断基準

照明光が変化したときに、表面そのものの色が変わったのではないと感じながらも、表面の見えの色は変化している。実際、室内の照明光の下で見たときと、屋外の太陽光の下で見たときで同じ表面の色の見えが微妙に異なる事はよく経験することである。しかし、一方では表面が変化したことは認識しないことも事

図1 実験装置概略

被験者から見て左側が色票をスポットライトで照明したテスト刺激、右側が CRT によってテスト刺激の D₆₅ 照明時を模擬した参照刺激。テスト刺激と参照刺激の周辺条件は常に同じ。被験者は手元のトラックボールを操作してマッチングを行なう。非順応時の実験では右眼単眼で視野を切り替える。順応時の実験では両眼隔壁がおかれ、被験者は左眼でテスト刺激、右眼で参照刺激を観察する。どの順応条件でもタイマー制御シャッターを通して刺激を観察する。

実であり、見えの色の知覚と、表面そのものの色の知覚とは区別されるべきものである。本論文では物体表面の属性としての色知覚、すなわち表面色知覚を surface color と呼び、その知覚をあわせることを surface-color match と呼ぶことにする。また、見えそのものの色の知覚を apparent color と呼び、その知覚をあわせることを apparent-color match と呼ぶ。各判断基準に対する被験者へのインストラクションは下記のとおりである。

apparent-color match:両方の刺激をそのままの状態で隣り合わせにおいたときに、全く同じになるように色をあわせる、周辺に刺激が呈示されている場合には周辺を無視して中央の色だけを完全に合わせるようにする。

surface-color match:両方の刺激は共に同じ紙を異なる照明で照らしたものである。両方の刺激をどちらか一方の照明の下に持っていった同時に観察した時に、全く同じ紙で構成されたものになるように合わせる。

本研究では全ての実験条件においてこの2種類の判断基準にもとづくカラーマッチングを行ったが、周辺刺激なしでは表面色知覚を得ることはできなかったため、surface-color match を行えなかった。実験ではセッション内の判断基準は一定である。

2.4 被験者

被験者 IK(25), TS(23), KU(42)は非順応条件、順応条件の両方を行った。3名とも色覚正常の男性である。被験者 RA(21), DM(22)はともにナイーブな被験者で色覚正常な男性であり、それぞれ、非順応条件、順応条件のみの実験を行った。

図3 非順応時、周辺刺激なしの被験者 IK の結果
●シンボルはテスト刺激の色度点、○シンボルは完全な色恒常性成立時の色度点を表している。□シンボルは apparent-color match の結果を表しており全ての照明条件においてテスト刺激の色度点とはほぼ完全に一致している。他の被験者に関してもほぼ同様の結果を得た。1,700K における色度図内の線分は実験に用いた CRT の色再現範囲を表す三角形である。

3. 実験結果

3.1 非順応条件

非順応時の実験結果を CIE(1931)xy 色度図にプロットし、図3, 4, 5に示す。○シンボルは D₆₅照明光の下でのテスト色票の色度点を表し、マッチング結果が完全に色恒常性を保つとすると、このシンボルと重なることになる。●シンボルはパネルの右上に記された各照明光の下でのテスト色票の色度点を表している。このシンボルにマッチング結果が一致すると、色恒常性が全く成立せず、見えがテスト刺激の測色値と同じだけ変化していることを表す。○, ●シンボルに関しては図3~6について共通である。□, ■はそれぞれ apparent-color match, surface-color match の結果を表している。これらについては順次、周辺刺激別に説明していく。なお、全体に被験者間の傾向の差があまり見られなかったため、モンドリアン周辺刺激の結果を除き、一人の被験者の結果で代表して示す。

3.1.1 周辺刺激なし

図3に周辺刺激なしの条件での被験者 IK のマッチング結果を □シンボルで表す。この条件では surface-color match を行なうことができなかったため、apparent-color match の結果のみを示す。全ての照明光においてほぼテスト刺激の測色点(●シンボル)と一致し、照明光の変化に対して色恒常性が全く成立しないことがわかる。1,700K において一部完全に一致していないのはテスト刺激の色度点が CRT の色再現範囲を越えているためである。従って、この周辺刺激条件では1,000K における実験を行なっ

図4 非順応時、灰色周辺刺激の被験者 IK の結果
○, ●シンボルについては図3に同じ。□シンボルは apparent-color match, ■シンボルは surface color-match の結果を表している。□シンボルは図3と同じ判断基準であるが大幅に○シンボルの方向にシフトしている。■シンボルは○シンボルに近く、高い色恒常性が成立していることが分かるが、完全な色恒常性からのシフトも残っている。

図5 非順応時、モンドリアン周辺刺激の結果

シンボルは図4に同じ。ここでは全被験者の結果を示す。パネルの違いは被験者の違いを表している。□シンボルが図4と比べてさらに○に近づいたことが分かるが、まだ■シンボルの方が高い色恒常性を示している。

ていない。

3.1.2 灰色周辺刺激

図4に灰色周辺刺激における被験者IKの結果を示す。□シンボルは apparent-color match を表しており、この結果は周辺刺激なしの条件(図3)と同じ判断基準で行なわれたマッチングであるにもかかわらず、灰色の周辺刺激がついただけで色恒常性成立方向への色シフトが起こっていることを表している。surface-color match の結果は■シンボルで表されている。apparent-color match に比べると色恒常性は若干高いが、依然完全な色恒常性(○シンボル)からの偏差は大きく、表面色の知覚レベルでも色恒常性が不完全であることを示している。

この灰色周辺刺激の1,000Kの照明光の条件では surface-color match の結果が D_{65} 照明下の無彩色色票の色度点付近に分布し、被験者によっては完全に無彩色色票の色度点に一致している。これは、被験者の表面色知覚が無彩色になって完全に色恒常性が失われているという興味深い結果を示している。apparent-color match は測色点と surface-color match を結んだ線上のほぼ中間にあり、テスト刺激の見えが測色点よりも低彩度になっていることがわかる。1,000K では周辺刺激をふくめ全てのテスト刺激の測色点は完全にスペクトル軌跡にのっているため、完全に見えそのもののマッチングが行なわれていれば、図3の1,700Kの条件のように CRT 色再現範囲の限界近くでマッチするはずである。しかし、得られた結果がそれよりも低彩度であるのは、マッチング用の参照刺激には D_{65} 照明下の灰色周辺刺激が呈示され、これがテスト刺激側の周辺刺激とは異なっているためであると考えられる。

3.1.3 モンドリアン周辺刺激

図5(a), (b), (c), (d)にモンドリアン周辺刺激の全被験者の結果を示す。apparent-color match の色度座標(□シンボル)は図4の灰色周辺刺激の場合に比べて完全な色恒常性(○シンボル)成立方向に近い結果が得られている。ここで、apparent-color match の判断基準は図4と同じであることに注目すると、周辺刺激に色のバリエーションが加えられただけでさらに色恒常性に近い結果が得られていることがわかる。表面色の知覚に関するマッチングである surface-color match の結果(■シンボル)では、さらに色恒常性に近いマッチング点が見られることがわかる。

1,000K については灰色周辺刺激での結果と同様である。

surface-color match の結果は被験者の見えが RA を除いて完全に無彩色であることを示している。apparent-color match の結果はテスト刺激の色度点と surface-color match を結ぶ線上のほぼ中間点にあり、周辺刺激を呈示することによって見えの彩度が低下していることがわかる。

3.2 順応条件

順応条件での被験者IKの結果を図6に示す。図2～5と同様に□シンボルは apparent-color match の結果を表し、3,400K～30,000Kの照明条件下では surface-color match (■シンボル)とはほぼ同等の色恒常性の成立を示している。すなわち、順応時のこれらの照明条件下では見えレベルで、ほとんど完全な色恒常性が得られていることを示している。1,700K, 2,400K においては、3,400K～30,000Kの照明条件下とは異なり、apparent-color match と surface-color match との間に大きな隔りがある。表面色知覚レベルでの色恒常性は得られているが、見えのレベルでは明らかに色恒常性が失われていることを示している。1,000K

については非順応条件と同様の結果が得られた。

図6 順応時、モンドリアン周辺刺激の被験者IKの結果
シンボルは図4に同じ。□シンボルがほぼ■シンボルに一致し、apparent-color が順応によって surface-color とほぼ同等の高い色恒常性を示していることが分かる。

4. 結果の解析

4.1 評価

色恒常性の成立の度合いを調べるための結果の評価は次のように行なう。各テスト色票のマッチング結果に対して、その色度座標と色恒常性が完全に成立した時の色度座標、すなわち D_{65} 照明下における各テスト色票の色度点、の間の距離を u^*v^* 空間上で計算する。これは、参照刺激における周辺刺激が D_{65} 照明下での色度点を模擬しているためである。その計算結果を周辺刺激、照明光、判断基準別に平均し、その観察条件(周辺刺激、照明光、判断基準)における色恒常性からの偏差とする。全てのテスト色票のマッチング結果が完全に色恒常性を示すときには、色恒常性からの偏差は0となる。以上を式に表すと次の通りになる。

$$E(j) = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \{ (\nu_i^j - \nu_i^{D65})^2 + (\nu_i^j - \nu_i^{D65})^2 \}^{1/2} \quad (1)$$

(ν_i^j, ν_i^j) はある観察条件(周辺刺激+判断基準+照明光) j における色票 i のマッチング結果の u^*v^* 空間における色度座標を表している。 $(\nu_i^{D65}, \nu_i^{D65})$ は D_{65} 照明光下における色票 i の測色値に基づく u^*v^* 色度座標を示している。この評価式ではあくまで被験者の色味の感覚を評価することを念頭においており、輝度(あるいは明度)の偏差は考慮にいられていない。この理由については考察において詳しく述べる。

全ての被験者の実験結果について式(1)に基づいて偏差評価を行なった。図7(a)~(d)は全ての被験者の1,700K~30,000Kにおける apparent-color matchの結果をプロットしたものである。パネルの違いは被験者の違いを表している。縦軸は(1)式で定義した偏差評価量である。縦軸の値が小さければ小さいほど色恒常性の成立の度合いが高いことを示す。指標として照明光の変化によるテスト刺激の測色点のシフトもプロットしており、この点に実験結果の解析点が一致すると完全に色恒常性が失われていることを示すことになる。横軸は照明条件の違いを示しており、スケールは u^*v^* 空間における各照明光の色度点の D_{65} 照明光の色度点からの距離である。1,000Kにおいては色の見えそのものが失われる形で色恒常性が完全に失われたため、色の見えがどのくらい完全な色恒常性からずれているかという解析には1,000Kの結果は用いなかった。この偏差評価方法についてはのちに考察する。

非順応状態の実験では被験者は交互に開閉するタイマー制御シャッターを通して右眼単眼で各々の刺激を観察する。シャッターの開閉時間は D_{65} 照明光の参照刺激側がテスト刺激側の1.5倍であり、試行間にはブース内の D_{65} 照明に順応している。さらにテスト刺激の照明光は試行ごとにランダムに変えられることから、テスト刺激側の特定の照明光への順応は最小限に押さえられ、被験者の視覚系は主として D_{65} 照明に順応していると考えられる。

図7のシンボルは、周辺刺激条件と判断基準の違いを表している。周辺刺激なしの条件では物理的色シフトと全く重なっている

ことから、完全に色恒常性が失われていることを示している。灰色周辺刺激の条件を示す点はテスト刺激側の各々の照明条件においてテスト刺激の測色点のシフトを示す点よりも下に位置し、比較的良好な色恒常性が得られていることを示している。モンドリアン周辺刺激の結果では、いずれの被験者も灰色周辺刺激の surface-color match とほぼ同程度の色恒常性が得られていることを示しており、順応が行なわれていない条件下でも周辺刺激に色の手掛かりが増えることで高い色恒常性が得られると言える。

図8において順応時と非順応時のモンドリアン周辺刺激の結果とを比較すると、順応時の方が高い色恒常性を示している。非順応時には見えの知覚(apparent-color match)が表面色知覚(surface-color match)に一致しておらず、見えではテスト刺激、参照刺激の間に部分的な色知覚の不一致があることを示している。一方で順応時の apparent-color match の結果は surface-color match の結果にはほぼ一致していることから、照明光への順応によって apparent color と surface color とが共にほぼ完全な色恒常性を得ていることがわかる。

5. 考察

5.1 2つの判断基準について

本実験では、2つの異なる照明光の下にある刺激の色知覚を合わせる実験(非対称マッチング)の判断基準として apparent-color match と surface-color match の2種類を用いた。apparent-

図7 非順応時の色恒常性成立の度合いの評価

縦軸は式(1)による色恒常性の成立の度合いを示す評価量で、値が0の時に完全な色恒常性が成立していることを示す。横軸は各照明光の色度点の D_{65} 照明光の色度点からの距離を u^*v^* 空間上でとったものを表している。パネルは被験者の違いを示し、シンボルの違いは判断基準と周辺刺激条件の違いを表している。◇シンボルはテスト刺激の色度点を式(1)の評価量で表したもので、これに一致すると完全に色恒常性が失われていることを示す。凡例中の appear.は apparent-color match, surf.は surface-color match, DARKは周辺刺激なし, GRAYは灰色周辺刺激, MONDはモンドリアン周辺刺激を表している。

図8 非順応時と順応時の色恒常性成立の度合いの比較

横軸、縦軸、ならびに◇シンボルの意味は図7に同じ。凡例中の略語は図7のものに加え、ADAPTは順応時(モンドリアン周辺刺激のみ)を表している。

color matchは見えの色を合わせる判断基準であり、マクスウェル視光学系の二分視野で行なわれているようなカラーマッチングの判断基準と同等と考えられる。surface-color matchは見えそのものの色よりも物体表面の属性としての色、すなわち表面としての色を合わせるマッチングで、表面色を用いた実験においてのみ考慮される判断基準である。実験結果から、全ての被験者がこの二つの判断基準を使い分けられていることがわかる。そこで、surface-color matchがapparent-color matchと比較して知覚としてどの程度安定しているかをみるために、それぞれの精度をマッチング結果の試行間の標準偏差(s)を比較した。図9は非順応時でモンドリアン周辺刺激の時のsurface-color matchとapparent-color matchの結果の試行間の標準偏差を、照明条件別にxy色度座標での大きさに換算したものである。今回は輝度方向の検討は割愛したが、これについては後述する。比較のため、同じ評価を周辺刺激なしのapparent-color matchに対して行ったものを黒いシンボルで表した。周辺刺激なしの刺激条件では、被験者は両方の刺激の測色点が同じになるように合わせるようになるため、その標準偏差はいわゆるMacAdamの色弁別楕円に相当したものになる。パネル(a)~(d)の違いは被験者の違いを表しており、RAはナイーブな被験者である。結果は周辺刺激なしの時の結果と比較すると、apparent, surface-color matchともに6,000Kより離れるに従って大きくなる様子を示した。

apparent-, surface-color matchの間で比較すると、両者と

も標準偏差の大きさはほぼ同じで、条件によってはapparent-color matchよりもsurface-color matchの方が小さな値を示している。ナイーブな被験者においても傾向は同じであり、被験者間で比較しても共通の知覚として安定して得られることが示された。以上から、surface-color matchとapparent-color matchの2つの判断基準はほぼ同程度の安定性を持った知覚に基づいていることが示された。

5.2 色差による偏差評価方法について

今回の実験結果の解析において1,000Kでの結果を省略したのは、テスト刺激の色度点が参照刺激に用いたCRTの色再現範囲を逸脱していることに加え、色恒常性の程度を評価する方法が1,000Kでは適切でないと考えられるためである。全ての色票が無彩色の見えになると、この偏差評価量は0.568に一致することから、1,700Kの周辺刺激なしのapparent-color matchの結果よりも無彩色の見えの方が色恒常性の程度がよいという結果になってしまう。しかしながら、共に色恒常性が完全に失われている意味においては同等であるため、この評価量が全く意味をなしていないことになる。これは偏差評価量として色度図上における距離のみを用いているためであるといえる。本論文で採用した色差量のみによる偏差評価は、過去にも明るさや色の恒常性の成立の程度を表す係数として試みられている⁹⁾¹⁰⁾。

今回の偏差評価量に限らず、一般に、各刺激の完全な色恒常性

図9 判断基準の違いの評価

横軸は照明光の違いを表し、縦軸は一つの周辺条件、判断基準及び照明条件でのマッチング結果のx方向、y方向の標準偏差(s)を全色票にわたって平均し、その二乗和を解平したものである。パネルは被験者の違いを表している。凡例中の appear. は apparent-color matching, surf. は surface-color matching, MOND は非順応時のモンドリアン周辺刺激, DARK は周辺刺激なしの条件を表している。appear. DARK の結果は MacAdam の色弁別楕円に相当する。

成立時の色度点を原点とした色差による評価量は、色相と彩度の変化を区別することができないという欠点もある。しかし色相と彩度の変化を何らかの方法で別々の評価量を設けて評価した場合には、逆に色相と彩度の評価量をどのような重みづけで統合するかという問題も含むことになる。この評価方法の議論は重要なものであるが、本論文の主題から外れるために、ここでは色差量による偏差評価を色恒常性からのずれとして考えて差しつかえない範囲の約1,700K から30,000K における結果のみを用いた。ただし今後の課題として、色相と彩度といった次元を考慮した色恒常性の評価量に関する検討が必要であろう。

5.3 CRT と色票の間のカラーマッチングについて

本実験では、テスト刺激として OSA 均等色尺度の色票、参照刺激として CRT 上に呈示した疑似色票を用いた。色票を完全な暗黒中で宙に浮くように支持し、色票の脇を漏れた光すらも被験者に見えないようにスポットライトを照射すると、周辺刺激なしでは色票であっても発光体のような見え、すなわち開口色モードの見えになる。一方、CRT を完全な暗黒の中に置いて、テスト色票に周辺刺激をつけた状態を模擬した画面を呈示すると、実際の色票との区別がつけられなくなり、表面色モードの見えを得ることができる¹¹⁾¹²⁾。

しかし、本実験では CRT で表示する画面では一部のテスト色

票の見えを再現できないことが生じた。具体的にはくすんだ色、若干の黒味がある色などの見えが再現ができなかった。実験ではこのような色票とのマッチングの際に被験者は実際のテスト刺激の輝度よりも、輝度を下げることによって見えを合わせようと試みている。つまり、色見えは合っているにもかかわらず明さ合わない状態でマッチングを終了せざるをえない状況が存在した。これは、被験者は輝度を合わせるよりも色見えを合わせることを重視してマッチングを行なったことの要因ともなっている。今回の実験の解析において輝度方向の特性を省略したのは以上の理由からである。この輝度方向の特性については、次の節で詳しく説明する。

物理的には CRT は自発光体、色票は反射物体である。視覚系に入射する光という意味では両者とも同じ物理量を持っていたとしても、今回の実験のように、見えの違いを生ずることは CRT と印刷物などの表示デバイス間の問題として広く知られていることである¹³⁾。この見えの違いの原因を究明するために、各方面で積極的に研究が行なわれているが、われわれも今回の実験と同じ実験装置でカテゴリカルカラーネーミング、カテゴリー比率評価法によって、CRT と色票の間での色見えを比較した実験を行っている。その結果では、表面色モードと開口色モードのいずれにおいても、CRT と色票の間で色見えにほとんど差がないことが示されている¹¹⁾¹²⁾。今回の実験のテスト刺激のくすんだ色や黒味とい

った見えは色票表面のテクスチャによって生じたもので、CRT 側ではそれが再現できなかったために見えの違いが生じたとも考えられる。しかし、ここでは実験的な確認を行なうことはできなかった。

5.4 輝度方向のマッチングの傾向について

図10は非順応時の3人の被験者のマッチング結果とテスト刺激の輝度比を色票、照明光、周辺刺激別にプロットしたものである。パネルの違いは周辺刺激の違いを表している。縦軸はマッチング結果とテスト刺激の輝度の比の対数をとったものである。横軸は8枚の色票ごとに5種類の照明条件を表している。左から、色票(-2, -2, 0)に対する1,700K, 2,400K, 3,400K, 6,000K, 30,000K, 色票(-2, -2, 2)に対する1,700K, 2,400K, ..., という順番である。OSA 均等色尺度(L, j, g)のうちLは明度を表し, jは黄色み(負の場合は青み), gは緑み(負の場合は赤み)を表している。(L, j, g) = (-2, 0, 0)はマンセルのN 5に対応する。同じ被験者の、同じ色票に対する結果は線で結んであり、シンボルの違いは被験者の違いを表している。

apparent-color match においては周辺刺激なしの条件では、被験者間でマッチング結果とテスト刺激の輝度比に差はあるものの、被験者内では(-2, 0, -2), (-2, 2, -2)の2つの色票をのぞいてはほぼ安定している。灰色周辺刺激、モンドリアン周辺刺激条件

については、マッチングとテスト刺激の間の輝度比はほぼ1に等しく(縦軸の0に相当)、輝度が一致していることが分かった。色票(-2, 0, -2), (-2, 2, -2)については、灰色周辺刺激、モンドリアン周辺刺激と周辺の情報が増えるに従って輝度比の照明光による差が小さくなっている。

surface-color match に関しては灰色周辺刺激、モンドリアン周辺刺激条件のいずれにおいても、ほぼ同様の傾向を示している。(-2, 0, -2), (-2, 2, -2)の2つの色票のに関しては照明光が約1,700K, 2,400K, 3,400Kにおいて特に他の色票と異なって縦軸の値が負になり、マッチングの輝度がテスト刺激の輝度より低いことを示している。これは5.3節で述べたように、くすんだ、あるいは黒味のある見えを再現するために輝度を低く設定していることを表している。逆に(-2, -2, 2), (-2, 0, 2), (-2, 2, 2)の色票に関しては、照明光の色温度が低いほどマッチングの輝度がテスト刺激の輝度より高いことを示している。

以上をまとめると、CRT と色票の間で行なうカラーマッチングでは、apparent-color match においてはどの色票についても輝度がほぼ一致するが、surface-color match においては一部の色票では輝度が一致しない。今回用いた色票および照明光の組み合わせでは、色温度が低いほど、緑みのある色票はCRTの輝度を高く、赤みのある色票に対しては輝度を低く合わせている傾向がみられた。

5.5 順応と周辺刺激の効果について

本研究では瞬時色恒常性における周辺刺激の効果が、色順応のある条件と比較してどの程度高いかを評価するために、モンドリアン刺激を周辺に呈示した上で15分間の予備順応を含んだ実験を

図10 輝度方向の偏差の評価

縦軸はマッチング結果とテスト刺激の輝度の対数を取ったものである。横軸は色票ごとの照明条件の違いを表している。パネル(a)~(d)は apparent-color match の結果、パネル(d)~(f)は surface-color match の結果を表している。シンボルは被験者の違い、パネルは周辺条件および判断基準の違いを表している。同じ被験者の同じ色票に対する結果は線で結ばれている。結ばれたシンボルは左から照明光が1,700K, 2,400K, 3,400K, 6,000K, 30,000Kの時の結果を表している。被験者 RA は非順応条件(パネル(a)~(c), (e), (f))のみ、被験者 DM は順応条件(パネル(d), (g))のみを行った。

行った。その結果, apparent-color match, surface-color match の順応時の結果はともに非順応時よりもさらに高い色恒常性を示した。特に apparent-color match の結果と surface-color match の差は非順応時よりも小さくなり, apparent color が surface color とほぼ同等の色恒常性を示した。この傾向は順応時, 非順応時の両実験を行った全ての被験者において共通であり, 非順応時の色恒常性は周辺刺激における手掛かりを増やすことによって向上するが, 完全な色恒常性を得るには至らず apparent color がほぼ完全な色恒常性を得るには順応が必要であることを示している。

一方, 周辺刺激なしの条件において, 順応のみによって色恒常性が成立することの可能性を検討してみる。本論文における周辺刺激なしの条件の刺激配置のように, 暗黒のなかにテスト/参照の両刺激が単独で呈示された状態を仮定する。両刺激を素早く交互に観察する条件(非順応条件)では surface-color match が不可能で, 色恒常性が完全に失われることは実験結果(図3)から明らかである。しかし, 両刺激の測色点を同じに合わせることは可能であった。

同様に周辺刺激なしの状態では, 両眼隔壁を用い各々の刺激に左右眼が別々に順応した状態でマッチングを行なうことを仮定する。この刺激配置ではテスト/参照の各刺激を各々長時間観察することによって左右眼がそれぞれの視野の周辺刺激なしの刺激に別々に順応する。言い換えれば, 同じ紙を異なる照明で照らして開口色モードの見えを生ずるときには, それぞれの眼に呈示された刺激の色度点に視覚系は別々に順応する。順応によって色恒常性が成立するためには, 視覚系がそれぞれの刺激の照明光の色度点の方向に順応する必要がある。しかし, 暗黒中に各眼に単一の開口色モードの刺激を呈示すると視覚系は照明光の分光成分と表面の分光反射率との積によって生じる色度点に順応する。従って, 各眼の順応状態は必ずしも各々の照明光の方向にシフトしない。加えて, 周辺刺激がない場合, 空間的な情報の統合によって順応状態の違いを補正する手掛かりは与えられない。従って, 周辺刺激抜きで順応のみによって必ずしも色恒常性を得ることはできない。

一方, Uchikawa ら¹⁴⁾¹⁵⁾は, 暗黒中に未知の照明光によって照明された状態でテスト刺激を呈示しても, テスト色票に対して面積比1/16の灰色の周辺刺激をつけることでカテゴリカルカラーネーミングにおいて色恒常性が得られたと報告している。この実験は, 被験者の照明光に対する順応時間が不定であり, マッチング実験でないことから我々の実験結果と直接の比較を行なうことはできないが, 周辺刺激が色恒常性に寄与する効果が大きいことを示していると言えよう。

これらのことを総合すると, 瞬時色恒常性は周辺刺激の手掛かりの増加によって向上し, ある程度の高い色恒常性を得ることができる。しかし, 周辺手掛かりを増やしても照明光への順応なしでは完全な色恒常性には至らない。一方で, 順応のみによっても完全な色恒常性を得ることはできないため, 周辺刺激の手掛かりと順応作用が総合されて初めて完全な色恒常性を得ることができると考えられる。

6. おわりに

以上の実験から導かれる結論をまとめると, 以下のとおりになる。周辺刺激は apparent color における瞬時色恒常性を向上させる。モンドリアン周辺刺激呈示時における apparent color は,

灰色周辺刺激呈示時の surface color にほぼ一致する程度の瞬時色恒常性を得ることができた。ただし, 非順応時には, apparent color において surface color と同等の色恒常性を得ることはできず, 照明光への順応を加えることによって初めて apparent color が surface color と同等の色恒常性を得られる事が明らかになった。

参 考 文 献

- (1) I. Kuriki, and K. Uchikawa, "Limitations of Simultaneous Color Constancy," (in preparation)
- (2) H. von Helmholtz, "Treatise on physiological optics," 1st ed. [1866] (3d ed. reprint; J. P. C Southall, trans). New York: Dover (1962)
- (3) M. D'Zmura, and P. Lennie, "Mechanisms of Color Constancy," J. Opt. Soc. Am. A, 3, pp. 1662-1672 (1986)
- (4) E. Land, "Recent advantages in retinex theory," Vision Res., 26, pp. 7-21 (1986)
- (5) J. von Kries, "Chromatic adaptation," Festschrift der Albrecht-Ludwigs-Universität, (1902)
- (6) D. H. Brainard, and B. A. Wandell, "Asymmetric Color Matching," J. Opt. Soc. Am. A, 9, pp. 1433-1448 (1992)
- (7) J. Walraven, T. L. Benzshawel, B. E. Rogowitz, and Lucassen, M. P., "Testing the contrast explanation of color constancy," From Pigments to Perception, (Valberg, A. and Lee, B. B. ed.), New York: Plenum Press, pp. 369-377 (1991)
- (8) A. Valberg, and Lang-B. Malecki, "Color constancy' in mondrian patterns: a partial cancellation of physical chromaticity shifts by simultaneous contrast," Vision Res., 30, pp. 371-380 (1990)
- (9) L. Arend, and A. Reeves, "Simultaneous Color Constancy," J. Opt. Soc. Am. A, 3, pp. 1743-1751 (1986)
- (10) E. Brunswik, "Zur Entwicklung der Albedowahrnehmung," Zeitschrift für Psychologie, 109, pp. 40-115 (1929)
- (11) 内川恵二, 栗木一郎, 篠田博之: 「開口色と表面色モードにおける色空間のカテゴリカル色名領域」, 照明学会誌, 77, pp. 346-354 (1993)
- (12) 内川恵二, 栗木一郎, 篠田博之: 「カテゴリー比率評価法による開口色と表面色モードの色の見えの表現」, 照明学会誌, 78, pp. 83-93 (1994)
- (13) 鈴木恒男: 「カラーアピランスとカラーマネージメント: 色の見えのモードを中心として」, VISION, 6, pp. 25-32 (1994)
- (14) H. Uchikawa, K. Uchikawa, and Boynton, R.: "Influence of achromatic surrounds on categorical perception of surface colors," Vision Res., 29, pp. 881-890 (1989)
- (15) K. Uchikawa, H. Uchikawa, and R. Boynton, "Partial color constancy of isolated surface colors examined by a color naming method," Perception, 18, pp. 83-91 (1989)

(受付日1994年7月13日/採録日1994年9月8日)