無彩色パターン知覚における周辺光効果の空間的加法性

正会員 岡 嶋 克 典 (防衛大学校)

Spatial Additivity of Surround Effects in Achromatic Pattern Perception

Katsunori Okajima (Member)

(National Defense Academy)

ABSTRACT

It is well known that perceived color is not determined by the photometric values but instead depends on the surrounding pattern and the adapting condition of the eye. It is important that we know how color in complex patterns appears because the scenes we usually see are complicated. In this study we estimated the surround effect for appearance of achromatic color with two and four surrounds by using a new matching method that gives us the equiluminance of the simple uniform surround. The magnitude of surround effects of plural stimuli can be qualitatively described by the equivalent luminance. The results show that the average luminance of surround stimuli cannot explain the total surround effects of plural stimuli, but the spatial additivity of surround effects depends on the stimulus conditions. In addition, some characteristics of the surround effects differ between conditions with gap and conditions without gap. The spatial additivity of surround effects in the present study can be expressed by the summation of the luminance values of each surround weighted as a function of the luminance of a central patch.

KEYWORDS: surround effect, spatial additivity, achromatic perception
color appearance, contrast effect, luminance

1. は じ め に

我々の知覚する色の見えは、その光の物理的特性だけでは決定されず、視覚の順応状態や周辺の刺激環境によって変化する。周辺刺激の色知覚に対する効果は、一般に対比現象として知られており、見えのモード¹⁾や色恒常性²⁾との関連も検討されている³⁾。対比効果の研究は、一様な周辺刺激を用いた実験条件において過去数多く行われているが、複数の周辺刺激が呈示された場合の定量的測定は少ない。日常生活において我々が見るパターンの色配列は通常複雑であることを考えると、複数列（観察対象とする刺激からみると複数周辺色）パターンにおける色の見えの定式化は応用上重要であり、視覚のメカニズムを探る面からも興味深い。最近、複数列有彩色を周辺刺激に用いた実験結果から、周辺の効果は個々の面積平均として表すことができないこと、及び色チャンネルと輝度チャンネルでその特性が異なっていることが示唆されている⁴⁾。したがって、色チャンネルと輝度チャンネルの特性を分離し、それぞれの周辺効果の加法性を詳しく検討することが重要であると思われる。そこで本研究では、輝度次元の周辺効果の加法性を説明する計算モデルを提案することを目的とし、色（色相や彩度）の効果を排除するために複数無彩色刺激のみを用いた色の

見えに関する実験を行なうこととした。

ところで、これまでの対比効果の測定には、周辺条件が異なる刺激間において、中央テスト光の見えが同じになるように比較光を合わせるマッチング法⁵⁾や、ある一定の見えになるように刺激中央のテスト光の強度を変化させる方法などのように、テスト光を変化させることによって周辺効果の大きさを求める方法が用いられている⁶⁾。しかし、これらの方法では、マッチングが成立した段階で中央光も周辺光も異なるため、測定結果として求められた中央光強度から周辺効果の大きさを数値的に求めるためには心理尺度に関連した仮定を必要とする。また、中央光の輝度によって周辺効果の加法特性が変化することが考えられるため、従来の中央テスト光を変える方法では真の特性が測定できていない可能性がある。すなわち、複数周辺刺激による効果を定量的に分析するためには、中央光を変えずに、曖昧な仮定を必要としない測定方法を開発する必要がある。

そこで本研究では、テストパターンと比較パターンの中央光は共に等しく固定し、複数白色周辺光に囲まれた中央光と同じ見えをもたらすような等価周辺光の強度を求める「等価周辺輝度測定法」を導入することで以上の問題を解決し、無彩色知覚における周辺光の効果の空間的加法性を定量的に検討した。この方法により、中央光強度による周辺効果の加法特性の違いを評価できると同時に、仮定を必要とせずに複数周辺効果の加法性を分析することが可能となる。

2. 実験

2.1 装置と刺激

刺激呈示装置には、コンピューターディスプレイシステム (Macintosh IIci と 13 インチカラーモニター) を用いた。測光に用いた分光放射計 SpectraScan704 (PhotoResearch 社) は、カナダ国立研究所の光標準化測定研究室において標準光源を使って校正された。モニタの設定をコントラスト最大及びブライトネス最小に固定し、電源を入れて輝度が安定期に入った後 (約 1 時間後)、実際に実験に用いるパターン (位置及びサイズ) を使ってモニタのキャリブレーションを行なった。RGB 各発光体のデジタル値に対する強度をコンピューター制御で自動測光し、そのデータを実験プログラム内にテーブルとして持たせ、色の加法則から測色値を計算することで任意の色を呈示できる。使用した D_{65} 白色において、計算値と実際の測光値の輝度と色度の誤差は、モニタと測光器の再現性誤差以下であった。実験及び測光は、すべて暗室内で行なわれた。今回、すべての刺激の xy 色度は標準白色光 D_{65} の色度点 (0.3127, 0.3290) に設定したので、それぞれの刺激は輝度のみが異なる。図 1 に、実験で用いたテストパターンと比較パターンの空間的構成を示す。テストパターンは中央光 (輝度値 L_c) と、その周囲に 2 分割または 4 分割された周辺光からなる。4 分割された周辺刺激も、対角線上の刺激は同じ輝度なので、1 つのテストパターンには結局 2 種の輝度値 (L_{s1} , L_{s2} , ただし $L_{s1} < L_{s2}$) を持つ周辺刺激がある。 L_{s1} と L_{s2} の間には $L_{s.av} = (L_{s1} + L_{s2}) / 2$ の関係があり、ある一定の $L_{s.av}$ に対して、この関係 (すなわち平均輝度は一定) を満たす適当なステップの L_{s1} と L_{s2} を設定した。したがって、周辺光の空間的な輝度平均は、常にある $L_{s.av}$ に設定されている。中央光の輝度レベル (L_c) には 21, 35, 55 (cd/m^2) の 3 種、周辺平均輝度レベル ($L_{s.av}$) には 25, 40 (cd/m^2) の 2 種を採用し、それらの組み合わせである 6 種の条件内でいくつかの L_{s1} と L_{s2} の組を選択した。周辺平均輝度が 25 (cd/m^2) の時の L_{s1} と L_{s2} の組み合わせレンジは、下の輝度 L_{s1} が 0 以上の範囲に限定される。また、周辺平均輝度レベルが 40 cd/m^2 の時に選択できる L_{s1} と L_{s2} のレンジは、 L_{s2} がモニタで表示できる最高輝度以下と制限される。したがって、その制限内ではほぼ等均等に变化するように、 L_{s1} と L_{s2} を 25 (cd/m^2) の時は 9 組、40 (cd/m^2) の時は 5 組の条件に設定した。ただし、 L_{s1} と L_{s2} が等しい時は結局 $L_{s1} = L_{s2} = L_{s.av}$ になり、一様周辺パターンになるが、これは後に述べる比較パターンと同一であり、マッチング結果は $L_{s.av}$ と等しいことが明らかとな

め、実際にはこの条件での測定は行なっていない。

このテストパターンの中央光に対してマッチングを行うために同時に呈示される比較パターンは、テストパターンと同じ中央光と、一様な周辺光で構成されている。また、テストパターン、比較パターンともに中央刺激と周辺刺激の間にギャップ (スクリーン上で 1 ドットライン) を入れたパターン (GAP 条件) と入れないパターン (no-GAP 条件) の 2 種を用いた。テストパターンと比較パターンは、モニタ上の左右の位置に十分離れて同時に呈示され、セッション毎に左右の位置を入れ替えた。モニタ上の左右のパターンの中間の位置から被験者の顔の間に縦置き隔壁 (パーティション) を配置し、それぞれのパターンが空間的に影響を与えないように配慮した。1 セッションは全ての条件が 1 回ずつ含まれており、刺激はランダムな順序で呈示される。GAP 条件のセッションと no-GAP 条件のセッションとがあり、1 セッションは以上の全条件 (3 種の中央光輝度と各 12 組の周辺輝度、及び 2 分割と 4 分割の 2 種) が各 1 回ずつ含まれた計 72 回のトライアルから構成されている。

2.2 等価周辺輝度測定法

これまでのマッチング実験では、両パターンの周辺光とテスト側の中央光を固定し、比較パターンの中央光を被験者が調節し、マッチング時の比較中央光の強度でその周辺効果を測定する方法がよく利用されてきた。しかし、この方法では、マッチング時の中央光の強度がテストパターンと比較パターンで異なり、中央光の強度が異なる場合の周辺光の影響量を見積もるための仮定を必要とするため、周辺効果を数値モデル化することが困難であった。そこで本実験では、複数周辺光の加法特性を直接的に評価するために、テストパターンと比較パターンの中央光は等しく固定し、その見えが同じになるように比較パターンの一様周辺光の強度の方を被験者が調節する「等価周辺輝度測定法」を導入した。この方法では、マッチング時の両中央光は物理的にも知覚的にも同じであるため、スケーリングの仮定が不要である。また、その時の比較パターンの一様周辺光の輝度値は、テストパターンの複数周辺光の総合的な周辺効果における空間的な等価輝度に相当し、周辺効果の加法性をこの等価輝度の大きさによって直接的かつ定量的に評価することができる。

2.3 実験手順

被験者は暗室内のモニタの前に座り、実験を開始する。被験者は、片眼でテストパターン、もう一方の眼で比較パターンを観察するハプロスコピック法でマッチングを行なった。刺激が呈示されると、被験者は両パターンの中央光の見えが同じになるように

図 1: 使用した刺激パターン。左から 2 分割テストパターン, 4 分割テストパターン, 比較パターン

比較パターンの周辺光の輝度をキーボードで調節する。刺激は被験者がマッチングを完了するまで連続的に呈示され、その時間は30秒から1分程度であった。マッチングが終了してボタンを押すと、刺激が消え、数秒後に次の刺激が呈示され同様の手順を繰り返す。1セッションに要した時間は約1時間であった。各被験者は、GAP条件のセッションとno-GAP条件のセッションを各8回、全16回のセッションを遂行した。

被験者は、色覚正常な男子2名(KO, GHF)である。共に心理物理学実験の経験が豊富であり、本実験の目的も熟知していた。

3. 結 果

実験結果は、各条件における測定結果の平均値で示すこととし、2分割パターンと4分割パターンの結果は両者の間に大きな違いが見られなかったので一緒に平均した。図2は、GAP条件における2人の被験者の実験結果で、上の一連のグラフは被験者KO、下は被験者GHFのデータを示す。水平の実線は中央光の輝度値Lc、水平の鎖線はテストパターンの平均周辺輝度値Ls.avを示している。図中の(a)から(f)は、テスト刺激の中央光輝度及び平均周辺輝度の異なる組み合わせにおける結果を表しており、例えば

(a)は中央光輝度が21(cd/m²)、平均周辺輝度が25(cd/m²)の時の結果である。左開きの上下2本の点線は、それぞれLs₁(下線)、Ls₂(上線)の軌跡である。シンボルは、被験者がマッチングした等価一様周辺光の輝度値Ls.eq(cd/m²)を対応するLs₂とLs₁の位置にプロットしたものであり、シンボルの真上及び真下にあたる位置で点線と交差した点の縦軸の値がその時のLs₂とLs₁の値を示す。例えば、(a)図の左端のシンボルは、Ls₁=50(cd/m²)、Ls₂=0(cd/m²)のテストパターンに被験者がマッチングした比較パターンの等価一様周辺光の輝度値Ls.eqを表している。

このグラフにおいて、もし複数周辺輝度の効果量がそれらの平均輝度で決まっているのであれば、すべてのLs.eqはLs.avと一致し、シンボルはテストパターンの平均周辺輝度値を示す水平の鎖線と重なるであろう。しかし、両被験者とも、シンボルと水平の鎖線とは一致していない。平均周辺輝度値が同じ条件間でもLs₁とLs₂の配分比によって等価周辺輝度の値は異なっており、複数周辺光の効果はその単なる平均輝度では説明できないことを示している。また、図2の(c)と(e)、(d)と(f)はそれぞれ同じ周辺光(Ls₁とLs₂の組み合わせが同じ)であるにもかかわらず、結果は大きく異なった様相を示しており、これは周辺効果の足し合わせ

図2：ギャップがある場合（GAP条件）の等価周辺輝度の結果。
(a)中央光輝度21cd/m²、周辺平均輝度25cd/m² (b)中央光輝度21cd/m²、周辺平均輝度40cd/m² (c)中央光輝度35cd/m²、周辺平均輝度25cd/m² (d)中央光輝度35cd/m²、周辺平均輝度40cd/m² (e)中央光輝度55cd/m²、周辺平均輝度25cd/m² (f)中央光輝度55cd/m²、周辺平均輝度40cd/m²

特性の決定に中央光の輝度 L_c が大きく関与していることを示唆している。

L_c が高い時 (図 2 (e), (f)) を除いて、いずれのグラフも右下がりであり平均輝度の値に収束していく形状を示しており、これは輝度の高い周辺光の効果が輝度の低い周辺光の効果よりも相対的に大きく効いていることを表している。一方、 L_c が高い時の結果を示す図 2 の (e), (f) は、被験者間で傾向に差が見られる。被験者 KO の結果は左下がりの形状になっており、これは他のグラフの傾向と大きく異なり、輝度の低い周辺光の効果が輝度の高い周辺光の効果よりも相対的に大きいことを表している。また、被験者 GHF の結果は、ほぼ単純平均に近い加法性を示している。

次に図 3 は、ギャップなし (no-GAP) 条件における結果を示す。被験者 GHF の場合、図 2 の GAP 条件の結果とはほぼ同様な結果が得られているが、被験者 KO の (c) では GAP ありとなしの条件間で傾向に大きな違いが見られる。被験者の内観によると、no-GAP 条件では、周辺光と中央刺激の輝度差が小さくなると同化現象が生じて周辺光と中央光の区別が消えたり、場合によっては透明視のような知覚⁷⁾が生じた。したがって、no-GAP 条件と GAP 条件間の結果の違いは、no-GAP 条件における同化現象や透明視現象が主な原因であると考えられる。

以上の結果から、無彩色パターンにおける複数周辺効果は周辺

光の平均輝度では決定されないこと、及び中央光と周辺光の間のギャップの有無によって周辺効果の特性が異なる場合があることが示された。

4. 考 察

本実験結果から、GAP がない場合 (no-GAP 条件) では、中央光と周辺光が密着しているために中央光と周辺光が等輝度になるあたりでの同化現象や透明視現象が生じていたと考えられる。同化現象や透明視現象には不明な点が多く、このような現象を含めた周辺効果のモデル化は現時点では困難であるため、今回は GAP 条件の結果を説明するモデルについてのみ考察する。

本研究では複数周辺効果を等価一様周辺強度によって定量化しているため、等価一様周辺強度を複数周辺強度によってどのように記述できるかを考えればよい。図 2 において、等価周辺強度の測定データが $Ls1$ と $Ls2$ の点線に挟まれた領域内にあることから、複数周辺効果は周辺光強度の単純平均ではなく、単純平均以外の加法式で表現できることが予想される。また、図 2 の各被験者の結果をみると、(a) と (b), (c) と (d), (e) と (f) でそれぞれ似た形状のグラフが得られており、特に被験者 KO の (e) と (f) の形状は他の左上がりの形状と大きく異なっている。(a) と (b), (c) と (d), (e) と (f) は、それぞれ中央光の輝度が同じ組み合わせであることから、加法性が中央光の輝度 L_c に依存していることは明白で

図 3 : ギャップがない場合 (no-GAP 条件) の等価周辺輝度の結果。(a)ー(f)の条件は図 2 と同様

ある。しかし、(a)と(b)、(c)と(d)、(e)と(f)のそれぞれの組み合わせ内では周辺平均輝度 $L_{s.av}$ が異なる (25cd/m²と40cd/m²) にもかかわらず、形状に大きな違いが見られないことから、周辺平均輝度 $L_{s.av}$ 及び L_{s1} , L_{s2} は加法特性に直接影響しないと仮定する。以上のことから、次のような GAP 条件における等価周辺光強度を与える実験式を考察することにする。

$$L_{s.eq} = w(L_c) \cdot L_{s1} + (1 - w(L_c)) \cdot L_{s2}$$

ただし、 $0 \leq w(L_c) \leq 1$

上式は、 $w(L_c)$ を重み係数とする L_{s1} と L_{s2} の重み付き加法式である。重み係数 $w(L_c)$ は、低輝度周辺光 L_{s1} の寄与と高輝度周辺光 L_{s2} の寄与の量を相対的に変化させる中央光輝度 L_c の関数であり、加法特性を決定するパラメーターである。 $w(L_c) = 0.5$ の時は、 $L_{s.eq}$ は $L_{s.av}$ に等しくなり、単純平均を表す。各被験者及び各中央光強度において、最も実験結果を近似する $w(L_c)$ を求めた後、上式に代入して実験結果 (シンボル) とともにプロットしたのが図 4 の太い実線である。これを見ると、一部に絶対値のずれが見られるものの、計算値は実験値の傾向を良好に予測しており、重み係数が中央光輝度 L_c によって変化する重み付き加法式で複数刺激の周辺効果を記述できることが示された。

図 5 のシンボルは、重み係数 $w(L_c)$ を各 L_c に対してプロット

したものである。この係数が 0.5 よりも小さい場合は、明るい周辺光 L_{s2} の効果が暗い周辺光 L_{s1} の効果よりも相対的に大きいことを示し、係数が 0.5 よりも大きい場合は、暗い周辺光 L_{s1} の効果が明るい周辺光 L_{s2} の効果よりも相対的に大きいことを示している。両被験者とも、中央光輝度 $L_c = 35$ (cd/m²) の時が 3 点の中で最も値が小さく、 $L_c = 55$ (cd/m²) の時に最大の値となっており、重み係数 $w(L_c)$ は L_c の単調関数ではないことがわかる。図 5 の実線は、シンボルデータを 2 次関数で近似したものであるが、データ点が 3 点しかなく、この形状の信頼性は低いので、ここでは参考に留めるだけにする。被験者 KO の $L_c = 55$ (cd/m²) (すなわち最も明るい中央光の場合) を除いては、暗い周辺光よりも明るい周辺光の方が中央光に与える影響が大きい。このことは、モニタ画像全体の平均輝度として周辺効果が与えられるのではなく、一般にモニタ画像中の明るい周辺部分が明暗知覚に大きく影響していることを示唆している。

以上の考察から推測される、複数周辺効果の加法性を説明する計算モデルを図 6 に示す。係数 $w(L_c)$ は、いわゆるゲイン関数と考えることができる。すなわち、複数周辺光はその輝度の高低によって、中央光の輝度に応じたゲインコントロールがなされた後、それらの効果が足し合わされているというメカニズムの存在を示唆するものである。また、図 5 の特性をテーブル化することによ

図 4：ギャップがある場合 (GAP 条件) の等価周辺輝度の実験値 (シンボル) と計算値 (実線) の比較。(a)ー(f)の条件は図 2 と同様

図5：重み係数 $w(L_c)$ 、中央光輝度 L_c に対する変化

って、中央光輝度レベルに応じた等価一様周辺輝度を計算式から求めることができる。デザイン現場や照明設計等の応用現場において、視覚系の特性に忠実な設計・評価を行なうためには、このような加法式を活用することが望まれる。そのためには、モニタでは表示できない高い輝度レベルを含む幅広い輝度レンジにおいて、同様な加法式モデルが適用できるのかを実験的に検証していく必要がある。

図6：無彩色複数周辺効果の重み付き加法的計算モデル

今回は、モデルの簡素化から、ゲインすなわち足し合わせの割合は中央光の輝度だけに依存し、そのゲインに応じて周辺強度（輝度）が足し合わされて等価一様周辺強度が決定されるという計算モデルによって実験結果を説明した。この加法式から得られた計算値は実験値とよい一致を示しており、本モデルの妥当性を示している。しかし、ゲインを決定する重み定数 $w(L_c)$ のテスト輝度による非単調なゲインの変化（図5）を理論的に説明することは今のところ困難であり、ゲインが中央光と周辺光の相互作用によって決定されるモデルを考えることによって、この問題を解決できる可能性もある。色の周辺効果に関する今後の課題は、周辺効果に関する視覚系の生理的メカニズムを解明することである。そのためには、モデルの精密化と実験を相補的に進めていく必要があると思われる。

5. まとめ

本研究では、等価周辺輝度測定法によって、無彩色知覚における複数周辺光の効果の空間的加法性を測定した。その結果、周辺効果の空間的合成は、周辺光の単純平均では規定されず、中央光によって調節される係数を伴う重み付き加法性に基づいて決定できることを示した。このことは、複数パターンにおける明るさ恒常性や実際の写真イメージの色の見えを考察する場合に、周辺効果を単純に周辺輝度の平均ではなく、個々の周辺光の影響を中央光輝度レベルに応じて個別に求める必要があることを示唆している⁹⁾。今後は、このような周辺効果をもたらす視覚系の生理的メカニズムを明らかにすると同時に、応用範囲が広い周辺効果の計算モデルの検討及び色覚モデルとの統合⁹⁾が望まれる。

最後に、本研究に対して多くの助言と援助をいただいた Alan R. Robertson 氏、及び実験に協力していただいた Graham H. Fielder 氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) 岡嶋克典, 池田光男: 白色光における輝面色モードと表面色モードの定式化, 光学, 18, pp.558-564(1989)
- (2) Land, E.D.: Recent Advances in retinex theory, Vision Res., 26, pp.7-21(1986)
- (3) 岡嶋克典: 色のモード変化と物体・光源認識, VISION, 4-1, pp.1-8(1992)
- (4) 岡嶋克典, 高瀬正典: 複数周辺色による色の見えの変化と周辺効果の加法性, 日本色彩学会誌, 18-1, pp.2-9(1994)
- (5) Yund, E.W. and Armington, J.C.: Color and brightness contrast effects as a function of spatial variables, Vision Res., 15, pp.917-929(1975)
- (6) Zaidi, Q., Yoshimi, B., Flanigan, N and Canova, A.: Lateral Interactions within color mechanisms in simultaneous induced contrast, Vision Res., 32, pp.1695-1707(1992)
- (7) Fukuda, M. and Masin, S.C.: Test of Balanced Transparency, Perception, 23-1, pp.37-43(1994)
- (8) Gershon, R. and Jepson, A.D.: The Computational of Color Constant Descriptors in Chromatic Images, Color Res. Appl., 14, pp.325-334(1989)
- (9) Okajima, K., Robertson, A.R. and Fielder, G.H.: Opponent Mechanisms and Categorical Naming in Color Vision, Investigative Ophthalmology and Visual Sci-

おかじま かつのり
岡嶋 克典 (正会員)

防衛大学校応用物理学教室。

昭和37年9月17日生まれ。平成2年東京工業大学大学院物理情報工学専攻博士課程修了。現在防衛大学校応用物理学教室講師。平成4年-5年カナダ国立研究所客員研究員。専門は視覚情報処理、色彩工学、センサ工学。日本色彩学会、日本視覚学会、応用物理学会、日本光学会、電子情報通信学会、OSA、ARVO、日本照明委員会に所属。工学博士(平成2年)。平成4年9月日本光学会奨励賞。