

水彩効果図形において輪郭の相対輝度が拡散色に及ぼす影響

黒木 美日子***・木村 英司*

*千葉大学 文学部

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

**現所属：千葉大学 大学院人文社会科学研究科

1. はじめに

われわれは、輪郭やエッジを処理し、それらによって囲まれた領域に色を充填させるという物体表面の色を効率よく知覚するための視覚メカニズムを有しており、色拡散現象（色がついていないはずの領域に、近傍の色が拡散する現象）は、この視覚メカニズムと関連していると考えられている。本研究では、色拡散現象の拡散色がどのようにして決定されているのかという問題について、色拡散現象の一つである水彩効果 (watercolor effect) を用いて検討していく。

水彩効果は、たとえば図1のような空間配置の図形において、紫の輪郭の内側にオレンジで縁取りをつけたとき（図1a）、口の字型の領域にオレンジが拡散して知覚される現象である。水彩効果は、このように内側輪郭の色が拡散して見える現象であることから、同化現象の一種とも考えられてきた¹⁾。これに対して、近年、同じ空間配置を持つ図形においても、場合によっては輪郭と異なる色が拡散して見えることが明らかになった^{2,3)}。たとえば、マゼンタの輪郭の内側に赤で縁取りをつけると（図1b）、赤で囲まれた領域内に黄色の拡散が知覚される。本稿では、この色拡散を異色拡散現象と呼び、これに対して通常的水彩効果を同色拡散現象と呼んで区別することとする。

なぜ、空間的には同一の水彩効果図形において、このように異なる色拡散現象が生じるのだろうか。拡散色を決める要因の一つとしては、

2本の輪郭の相対輝度が挙げられる。先行研究の知見を総合すると、内側輪郭の輝度が相対的に高い場合には同色拡散現象が生じ、逆の輝度関係の場合には異色拡散現象が生じると考えることができる^{1,3)}。これに対して、別の要因としては、輪郭色の組合せも考えられる。同色拡散現象に関しては、基本的になどのような色の組合せでも生じるとされているのに対して¹⁾、異色拡散現象が報告されている輪郭色の組合せは、赤-マゼンタのほか、黒-青、緑-シアン³⁾の3種類に限られており³⁾、異色拡散現象は特定の輪郭色の組合せのみにおいて生じる可能性も考えられる。

以上から実験1では、輪郭の相対輝度と輪郭色の組合せを操作し、水彩効果図形における拡散色がそのどちらによって決まっているのかを検討する。

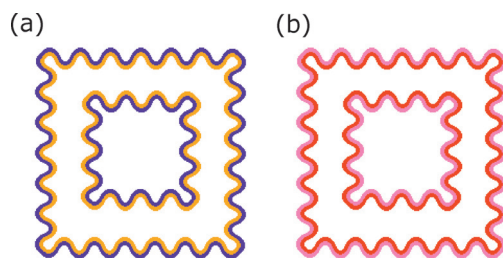


図1 水彩効果図形の例

(a) は、紫の外側輪郭とオレンジの内側輪郭からなる通常的水彩効果図形である。図形の口の字部分には内側輪郭と同色のオレンジが拡散して知覚される（同色拡散現象）。(b) は、マゼンタの外側輪郭と赤の内側輪郭からなる水彩効果図形であり、口の字部分にはどちらの輪郭色とも異なる黄色が拡散して見える（異色拡散現象）。

2. 実験 1

2.1 方法

装置 RGBそれぞれに15ビットの色深度を持つビデオカード (Cambridge Research System 社, VSG2/5) を Matlab 7.1 で制御することによって刺激を生成し, 21 インチ CRT ディスプレイ (SONY GDM F-500R, 1280×962 pixel, 80 Hz) 上に提示した. 観察距離は 86 cm であった.

刺激 刺激としては, 2本の波状の輪郭を持つ二重の正方形 (外側 3.7°, 内側 2.1°) を用いた (図1). 線の太さは 4.5', 波の周期は 1.9 cpd, 振幅は 0.4° であった. 二重の正方形の間の領域 (ロの字部分) を検査野とした.

輪郭色条件としては, 同色拡散現象と異色拡散現象の色の組合せの代表例として, オレンジ-紫条件と赤-マゼンタ条件を設けた. オレンジ-紫条件では, 内側輪郭にオレンジ (CIE $u'v'$ 色度座標は, $u'=0.2297, v'=0.5068$), 外側輪郭に紫 ($u'=0.2047, v'=0.4188$) を用い, 赤-マゼンタ条件では, 内側輪郭に赤 ($u'=0.2463, v'=0.4804$), 外側輪郭にマゼンタ ($u'=0.2313, v'=0.4312$) を用いた. これらの色は, すべて CIE $u'v'$ 色度図上において白色点から 0.05 の距離にあり, 飽和度がほぼ一定になるようにした. 輝度条件としては, 各輪郭条件について, 内側輪郭または外側輪郭のどちらか一方の輝度を 20 cd/m^2 に固定し, もう一方の輪郭の

輝度を 5 から 55 cd/m^2 の範囲で変化させることにより 13 条件を設けた. 刺激は白背景 (60 $\text{cd/m}^2, u'=0.1978, v'=0.4683$) 上に提示した.

手続き 打ち消し法を用いて拡散色を定量的に測定した. 被験者の課題は, 検査野が無彩色となるように色度を調整することであった. 実験は暗室で行い, 5 分間の暗順応と, その後の白色背景に対する 2 分間の明順応の後に測定を開始した.

被験者 正常な視力と色覚を持つ 3 名 (うち 1 名は第 1 著者) が実験に参加した.

2.2 結果と考察

調整結果は CIE $u'v'$ 色度図上にプロットし, 白色点から調整値へと向かうベクトルの方向を「拡散色の色み」を表す指標として算出し (角度は, $+u'$ 方向を 0° とし計算), 被験者間で平均した (図2). 図2から, オレンジ-紫条件においても赤-マゼンタ条件においても, 拡散色は同様に変化し, 内側輪郭の輝度が相対的に高い条件では内側輪郭色に近く, 輝度関係が逆になると黄色もしくは外側輪郭の補色の方向に近づくことがわかる. すなわち, 水彩効果の拡散色は輪郭色の組合せではなく輪郭の相対輝度によって変化し, 内側輪郭の輝度が相対的に高い条件では同色拡散現象が生じ, 相対輝度が減少するにつれて異色拡散現象へと連続的に推移していくことが示された.

実験 1 でみられた水彩効果図形における色拡

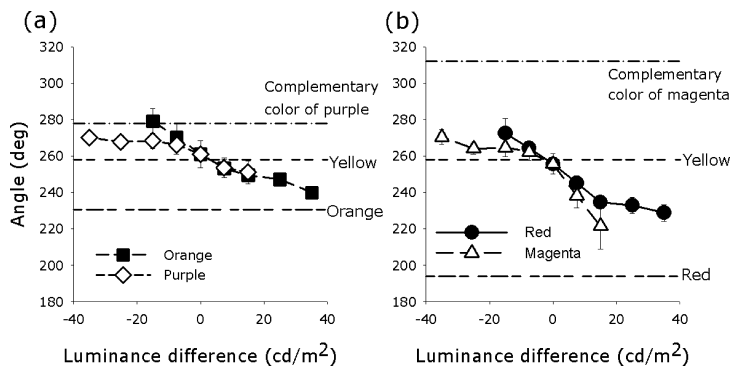


図2 内側輪郭と外側輪郭の輝度差による拡散色の変化 (実験1)

(a) オレンジ-紫条件の結果, (b) 赤-マゼンタ条件の結果. 横軸の輝度差は, 内側輪郭の輝度のほうが高い場合に正の値となる. 図中の横線は, 刺激として用いた色もしくはその補色が拡散した場合の角度を表している. 異なるシンボルは輝度を操作した輪郭色を示しており, 誤差棒は標準誤差を表している.

散を検討するうえで、ネオンカラー効果に関して提案されている拡散色の決定メカニズム⁴⁾が参考になる。この説は、Grossberg & Mingolla (1985) により提案された神経モデルに基づいており、Boundary contour system (BCS) と呼ばれる「見えない境界」を作るシステムと、Feature contour system (FCS) と呼ばれる色や明るさを充填させるシステムの働きによって主観的輪郭の形成とネオンカラー効果の発生を説明する。メカニズムの詳細は本稿の範囲を超えているが、ここで重要なのは、図3のようなネオンカラー効果に関して、内側の十字図形からの色拡散(図3 灰矢印)だけでなく、外側の誘導図形と十字図形の境界における対比(側抑制)の働きにより誘導図形の補色が誘導され(図3 白矢印)、両者の加法混色によって拡散色が決定されると仮定されていることである⁴⁾。この説明を水彩効果図形に当てはめると、内側輪郭色と外側輪郭の補色の加法混色によって拡散色が決まることになり、実験1の結果において拡散色が内側輪郭に近い色になる場合(同色拡散現象)と、外側輪郭の補色に近づく場合(異色拡散現象)とがあることにうまく対応する。また、混色の際の色成分の比率は輪郭の相対輝度に応じて変わり、輝度の高いほうからの色成分がより強くあらわれると仮定すると、実験1の結果を説明することができる。実験2では、この説明の妥当性を検討する。

3. 実験 2

水彩効果図形における拡散色に関する上記の仮説が正しいのであれば、外側輪郭の色相を変

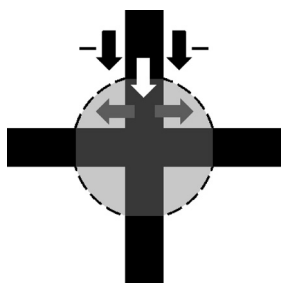


図3 Bressan (1995) によるネオンカラー効果の拡散色についての説明

化させると、特に外側輪郭の輝度が高い条件において、拡散色が系統的に変化するはずであり、さらに、内側輪郭の輝度が高い条件では内側輪郭色の拡散効果が強くあらわれることが予想される。実験2では、外側輪郭の輝度が高い条件とその逆の輝度条件を設け、これらの予測について検討する。

3.1 方法

刺激の内側輪郭色は、赤 ($u'=0.2463, v'=0.4804$) もしくはオレンジ ($u'=0.2324, v'=0.5045$) とした。外側輪郭の色は、CIE $u'v'$ 色度図上において、色相が等間隔になる8条件(白色点から内側輪郭色への方向を始点(0°)として、45°刻みで白色点から等距離の色度点)を使用した(図4を参照)。輪郭の輝度に関しては、内側輪郭が20 cd/m²で外側輪郭が45 cd/m²の条件と、その逆の輝度条件を設けた。被験者は、視覚・色覚が正常な5名(うち1名は第1著者)であった。これ以外の方法は、実験1と同様であった。

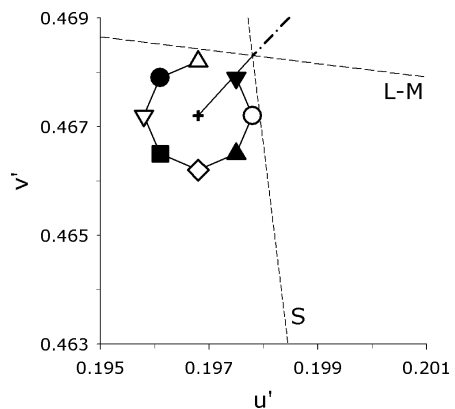


図4 結果の予測(実験2)

右斜め上方向の一点鎖線は内側輪郭に用いたオレンジの方向を示しており、内側の輪郭色が拡散した場合には、打ち消し法による調整結果は、白色点を挟んでそれとは反対方向へのシフトとしてあらわれるはずである(+), 外側輪郭の補色が誘導された場合には、その色相(色方向)に応じて調整結果も変わり、調整点が円周上で等間隔に並ぶことが予想される。シンボルは外側輪郭の色方向を示す(△:45°~▼:360°, 45°ステップ)。図には、参考のため、S錐体軸方向とL-M軸方向が示してある。

もし、内側輪郭色の拡散と外側輪郭の補色の誘導のどちらも強く生じ、両者の加法混色によって拡散色が説明されるのであれば、結果は図4のようになると予測される。

3.2 結果と考察

被験者間で平均した調整結果を図5に示す。外側輪郭の輝度が高い条件においては(図5a, b), S錐体軸方向に引き伸ばされたような形になっているものの、予測と一貫した結果となり、内側輪郭色も外側輪郭の補色も誘導されていたことがわかる。ただし、全体的に白色点からのシフトは小さくなく、内側輪郭色はあまり強く拡散していなかったと考えられる。内側輪郭の

輝度が高い条件においては(図5c, d), 調整点は色度図上で近い位置にまとまっており、外側輪郭の補色の誘導はあまり明確ではない。ただし、調整点は内側輪郭色と反対方向に大きくシフトしており、内側輪郭色の拡散が強く生じていたと考えられる。以上の結果は、水彩効果図形においては、内側輪郭色の拡散と外側輪郭の補色の誘導の両方が生じ、そのどちらの影響が強いかは、内側輪郭と外側輪郭の相対輝度に応じて変わるという仮説と一貫している。

なお、本実験の結果では、外側輪郭の補色の誘導はS錐体軸に沿って強く生じたことから、この色誘導過程にS錐体過程が強く関与するこ

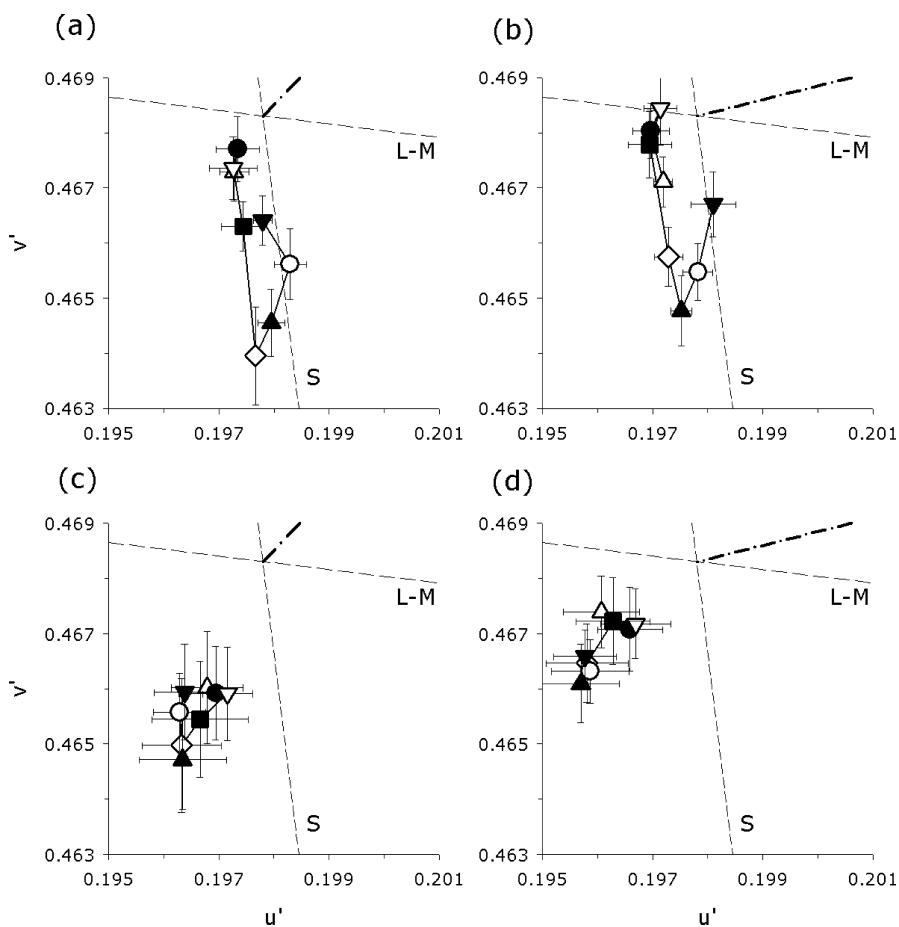


図5 実験2の結果

(a) 外側輪郭の輝度が高く内側輪郭がオレンジの条件, (b) 外側輪郭の輝度が高く内側輪郭が赤の条件, (c) 内側輪郭の輝度が高く内側輪郭がオレンジの条件, (d) 内側輪郭の輝度が高く内側輪郭が赤の条件。誤差棒は標準誤差を表している。

とが示唆されるが、そのメカニズムについては明らかではない。

4. 総合考察

本研究では、水彩効果図形の拡散色は、内側輪郭色の拡散と外側輪郭の補色の誘導によって決まること、そして、輪郭の相対輝度が高いほうからの色成分がより強くあらわれることが示唆された。このうち、内側輪郭色の拡散は、先行研究で指摘されていたように同化現象と同様の働きであるが、外側輪郭の補色の誘導がみられることから、水彩効果図形における色拡散は単なる同化現象ととらえることはできないと考えられる。

最後に、現象観察によれば、水彩効果やネオンカラー効果以外の色拡散現象においても、輪郭の色や輝度の組合せが同じであれば、非常によく似た拡散色が知覚される。このことから、他の色拡散現象の拡散色についても、本研究で示されたメカニズムで説明できる可能性が考えられる。

文 献

- 1) B. Pinna, G. Brelstaff and L. Spillmann: Surface color from boundaries: A new 'watercolor' illusion. *Vision Research*, **41**, 2669–2676, 2001.
- 2) B. Pinna: The neon color spreading and the watercolor illusion: phenomenal links and neural mechanisms. G. Minati, E. Pessa & M. Abram (eds.): *Systemics of Emergence: Research and Development*. Springer, New York, 235–254, 2006.
- 3) A. Kitaoka: 「謎の水彩効果」北岡明佳の錯視のページ <http://www.psy.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/hokan.html>, 2007.
- 4) P. Bressan: A closer look at the dependence of neon color spreading on wavelength and illuminance. *Vision Research*, **35**, 375–379, 1995.
- 5) S. Grossberg and E. Mingolla: Neural dynamics of form perception: boundary completion, illusory figures, and neon color spreading. *Psychological Review*, **92**, 173–211, 1985.