

2つの視覚的文法から見た色の知覚の再検討

Color vision in two contexts

北岡明佳 Akiyoshi Kitaoka 立命館大学

Ritsumeikan University

Keywords: 並置混色, 加法混色, 減法混色, 色の錯視, 明るさの錯視, ムンカー錯視.

1. はじめに

色の錯視は文字通り色々あるが、本稿ではそれらのいくつかに通じた枠組みが見られることを指摘するものである。具体的には、並置混色とムンカー錯視には密接な関係があるとして、論考を深める。

2. 並置混色

並置混色とは、色を表現するにあたり、比較的少数の色を空間的に並べて表現する混色である。絵画の点描は並置混色にあたる。例として示す図1は、白地にシアン (C)、マゼンタ (M)、イエロー (Y) の三色のドットで表現したトマトの写真である。

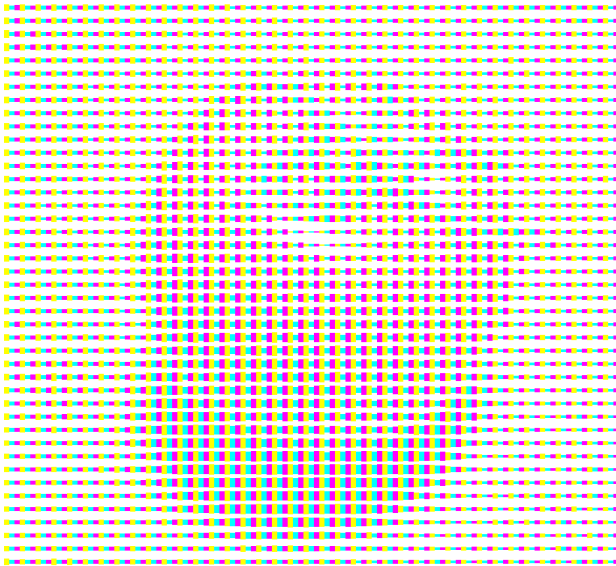


図1 トマトの写真画像を並置混色（減法混色）変換して得られた絵。背景は白で、シアン、マゼンタ、イエローの3色で構成されている。

3. 並置混色には加法混色と減法混色がある

図1は減法混色で表現した絵であるが、PCやスマホのディスプレイは、加法混色の並置混色を採用している。すなわち、黒地に赤 (R)、緑 (G)、青 (B) の原色を置くことで、色を表現している。それらのディスプレイでは、構造上は並置混色でも、網膜の細胞で弁別できない程度の細かさで表示されているため、網膜像上では色は融合しており、視覚的には並置混色ではない。

しかし、真の並置混色の画像でも加法混色は可能である。図2は図1の元画像を加法混色変換して得た並置混色画像である。これもトマトの画像であることがわかる。

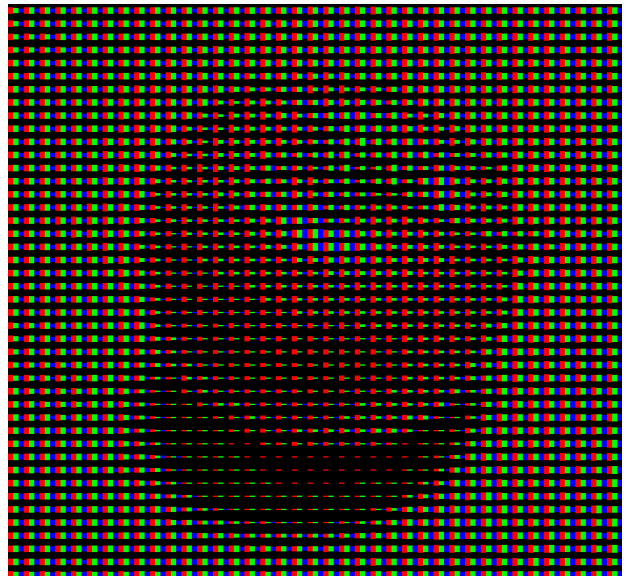


図2 トマトの写真画像を並置混色（加法混色）変換して得られた絵。背景は黒で、赤、緑、青の3色で構成されている。

4. 並置混色におけるRGBを原色とする加法混色とCMYを原色とする減法混色

並置混色において、RGBを原色とする加法混色とCMYを原色とする減法混色の構造を、図3に示す。図1と図2は原色の明るさを面積で表現したが、これ以降は画面はサブピクセル（原色で

ある RGB や CMY が描画される固定の大きさの領域あるいは最小画素のことで埋め尽くし、各サブピクセルの明るさの変調で色を表現する画像で説明する。

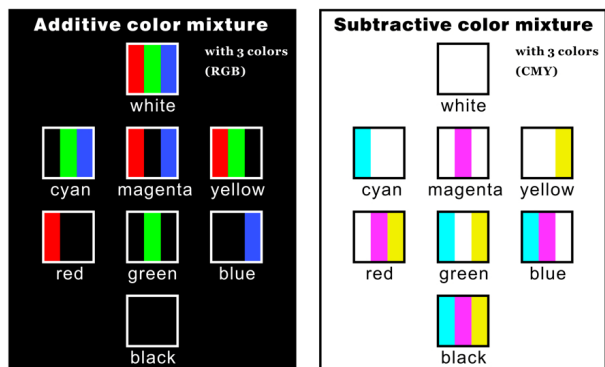


図3 RGBを原色とする加法混色系(左)とCMYを原色とする減法混色系(右)。加法混色では、デフォルトは黒であり、減法混色では白である。1ピクセルを3つのサブピクセルに分割し、たとえば赤は、加法混色ではRのサブピクセルの着色で表現し(GとBのサブピクセルはデフォルトの黒)、減法混色ではMとYのサブピクセルの着色で表現する(Cのサブピクセルはデフォルトの白)。加法混色では白はRGBで表現され(左上)、減法混色では黒はCMYで表現される(右下)。

5. 並置混色の加法混色の白は減法混色の黒よりも暗い

並置混色では、加法混色の白は並置されたサブピクセルRGBで表現され、減法混色の黒はサブピクセルCMYで表現されるため、白が黒よりも物理的に暗いという奇妙なことが起こる。たとえば、R, G, B, C, M, Yのサブピクセルの輝度をそれぞれ $L_R, L_G, L_B, L_C, L_M, L_Y$ と表すならば、 $L_C = L_G + L_B, L_M = L_R + L_B, L_Y = L_R + L_G$ だから、減法混色の黒の輝度は $(L_C + L_M + L_Y) = 2(L_R + L_G + L_B)$ となっており、加法混色の白の輝度の2倍である。ところが、図4に示す通り、必ずしもそのようには見えない。

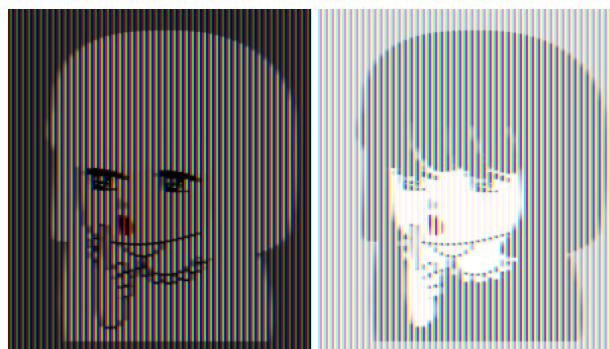


図4 RGB加法混色による(髪と服の)白(左の絵)とCMY減法混色による黒(右の絵)の比較。左の絵の白の平均輝度は右の絵の黒の半分であるが、左の絵の方が明るく見えるか、あるいは同じ程度の明るさに見える。

6. CMYを疑似原色とする加法混色とRGBを疑似原色とする減法混色の開発

通常の加法混色はRGBのサブピクセルで構成する(図3左)が、これをCMYのサブピクセルで置換することができる(図5左)。その場合は、1ピクセルを6サブピクセルで構成する。一方、減法混色はCMYのサブピクセルで構成する(図3右)が、これをRGBのサブピクセルで置換することができる(図5右)。その場合も、1ピクセルを6サブピクセルで構成する。

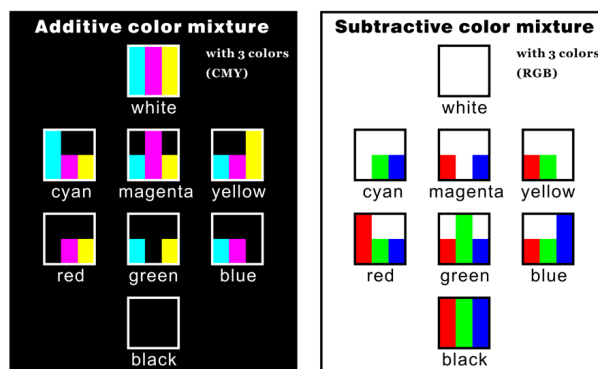


図5 CMYを疑似原色とする加法混色系(左)とRGBを疑似原色とする減法混色系(右)。1ピクセルを6サブピクセルに分割し、たとえば赤は、加法混色ではMとYの1サブピクセルずつで表現し、減法混色では2サブピクセルのRと1サブピクセルずつのGとBで表現する。この場合、加法混色では白はCMYそれぞれ2サブピクセルずつで表現され(左上)、減法混色では黒はRGBそれぞれ2サブピクセルずつで表現される(右下)。

7. 並置混色における錯視図形

RGBを原色とする加法混色では、白はRGBで表現され(図3左上)、RGBを疑似原色とする減法混色では、黒はRGBで表現される(図5右下)。

すなわち、白と黒は同じ RGB の色縞で表現できる。ということは、錯視のデモの材料として使うことができる。

図 6 においては、左の絵の髪と服は白く見え、右の絵のそれらは黒く見えるが、同じ RGB の色縞である。

同様に、CMY を疑似原色とする加法混色では、白は CMY で表現され (図 5 左上)、CMY を原色とする減法混色では、黒は CMY で表現される (図 3 右下)。すなわち、白と黒は同じ CMY の色縞で表現できる (図 7)。



図 6 RGB 加法混色による白表現 (左) と疑似 RGB 減法混色の黒表現 (右) の比較。髪と服はどちらも同じ RGB の色縞でできているが、左の絵では白、右の絵では黒に見える。

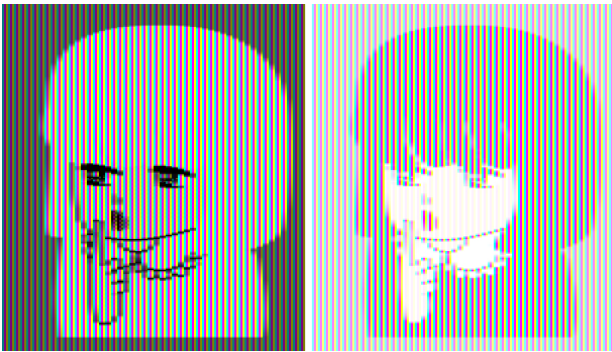


図 7 疑似 CMY 加法混色による白表現 (左) と CMY 減法混色の黒表現 (右) の比較。髪と服はどちらも同じ CMY の色縞でできているが、左の絵では白、右の絵では黒に見える。

8. 2つの視覚的文法

並置混色の加法混色は、これまで広く受け入れられてきた highest luminance rule¹⁾ (最も明るいところが白と知覚され、それがアンカーとなって他の明るさ知覚が決まっていくという法則) が適用できる。一方、減法混色は“lowest luminance rule” (最も暗いところが黒と知覚され、そこがアンカーとなって他の明るさ知覚が決まっていくという考え方) が適用できるのではないかと。

すなわち、加法混色と減法混色は、色の表現の

やり方の違いというだけでなく、視覚系自体が持つ色の解釈の文法の違いでもある可能性が示唆される。色覚にも、加法混色系と減法混色系があるという考え方である。

両者に共通することは、「コントラストの最も高い部分がアンカーとなる」ということである。これは、グレースケールで同等の画像を作成した時にも共通して見られる (図 8)。ということは、この二分類は色覚に限定されるわけではなく、視覚そのものが持つ機能であることが示唆される。



図 8 左の髪と服は白く見え、右のそれらは黒く見えるが、同一の白と黒の色縞模様でできている。なお、左の絵の白く見える部分は白の色縞が太く見え、右の絵の黒く見える部分は黒の色縞が太く見えるが、縞の幅は白と黒で同じである。これは、明るさの知覚が引き起こす幾何学的錯視 (形の錯視) の例である。

9. ムンカー錯視

さて、話は変わって、ムンカー錯視²⁾ についてである。ムンカー錯視とは、図 9 のような刺激配置の色の錯視である。

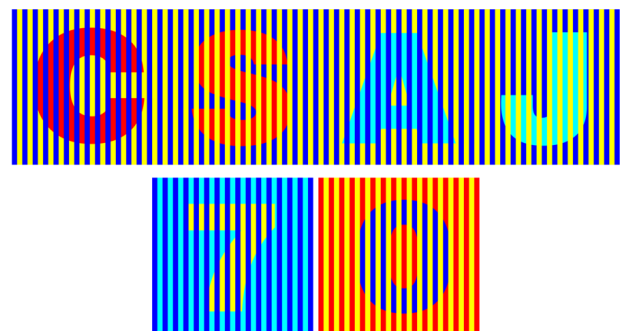


図 9 ムンカー錯視の例。C と S に用いられている色は同じ赤色であるが、C はマゼンタ色 (赤紫色) に、S はオレンジ色に見える。同様に、A と J に用いられている色は同じシアン色であるが、A は水色に、J はやや緑色に見える。ちなみに、ムンカー錯視に関連する現象として指摘されてこなかったと思うが、7 と 0 は、それぞれ A と S の内外の配色を入れ換えたパターンであり、どちらも青と黄の色縞で

あるが、7は明るく、0は暗く見える。

この錯視は、ターゲットの周囲からの色の対比と、短冊状に上にかぶせたパターンからの色の同化の両方が働いて色が誘導されると考えられる(図10)。

筆者が「黄ばみ効果」と呼んでいる色の錯視は、この考え方と矛盾しない(図11)。たとえば、図11左の白いオーストラリアには、上にかぶせた緑色が同化するとともに、周囲のシアン色の反対色である赤が誘導されるので、両者が混色して黄色が誘導される、と説明できる。



図10 ムンカー錯視における色の誘導(同化と対比)。一番下の列のオーストラリアは、左は赤と青、右は赤と黄の縞模様であるが、左のオーストラリアの赤部分はマゼンタ色(赤紫色)に見え、右のオーストラリアの赤部分はオレンジ色に見える。

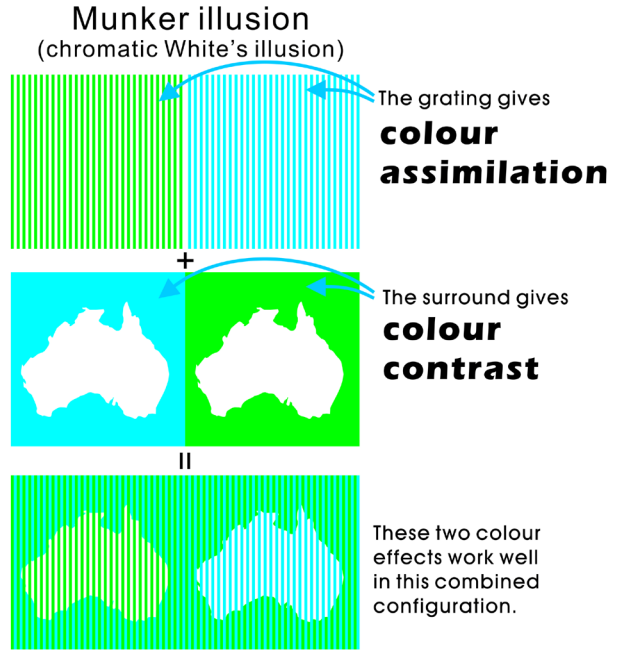


図11 「黄ばみ」効果。一番下の列のオーストラリアは、左右とも白と緑あるいは白とシヤンの縞模様であるが、左のオーストラリアの白部分は黄色く見える。

10. ムンカー錯視における背景への注目

ムンカー錯視は色の錯視であるから、観察者の注意はターゲットの色の変化に向いてしまうが、その外側を見てみよう。たとえば、図9でCの外側は青と黄の縞模様であるが、明るく見える。一方、Sの外側も青と黄の縞模様であるが、暗く見える。AとJでも同様である。

図12の上段では、左のハートの周囲は明るく見え、右のハートの周囲は暗く見える。内外の配色を入れ換えると図12の下段となり、左のハートは明るく見え、右のハートは暗く見える。

これは、並置混色の加法混色と減法混色において、同じ色縞が白に見えたり黒に見えたりすること(図6、図7)と類似している。

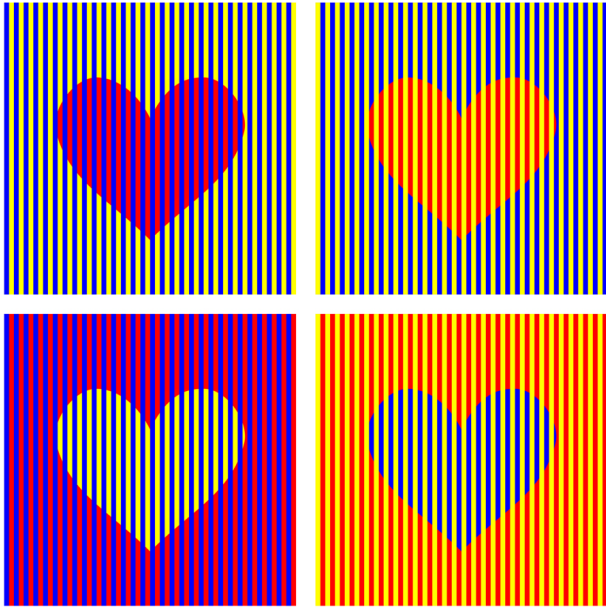


図 12 上段の左のハートはマゼンタ色に見え、右のハートはオレンジ色に見えるが、同じ赤色である（ムンカー錯視）。下段は上段のハートの内外の配色を入れ換えたもので、左のハートは明るく、右のハートは暗く見えるが、同一の青と黄の縞である。ちなみに、左のハートの黄色の縞の幅は青色のそれよりも太く見え、右のハートの青色の縞の幅は黄色のそれよりも太く見えるが、図 8 と同様の幾何学的錯視である。

1.1. ホワイト効果でも同様である

ムンカー錯視のグレースケール版の錯視（明るさの錯視）は、ホワイト効果と呼ばれる³⁾。ホワイト効果は、物理的に同じ輝度の対象の見えの明るさが異なって見える現象である。

ホワイト効果でも、上記と同様のことがデモできる。すなわち、図 13 の上段では、左のハートの周囲は明るく見え、右のハートの周囲は暗く見える。内外の配色を入れ換えると図 13 の下段となり、左のハートは明るく見え、右のハートは暗く見える。この見え方は、図 8 の髪と服の白と黒の知覚と類似している。

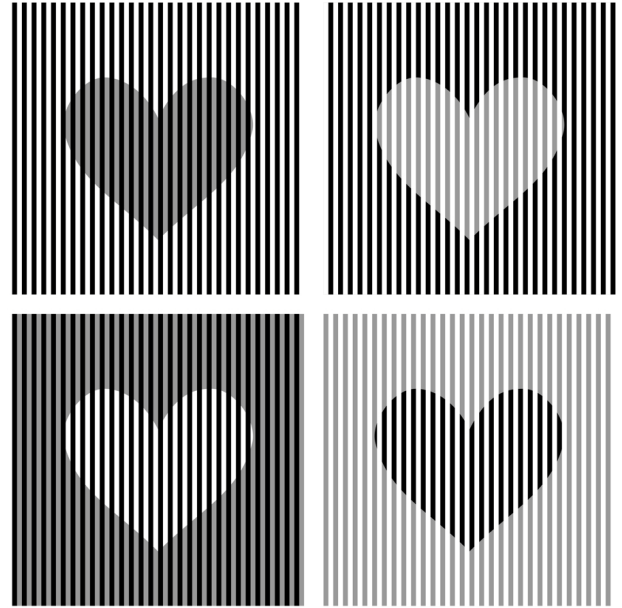


図 13 上段の左のハートは暗く見え、右のハートは明るく見えるが、同じ輝度の灰色である（ホワイト効果）。下段は、上段のハートの内外の配色を入れ換えたもので、左のハートは明るく、右のハートは暗く見えるが、同一の白と黒の縞である。なお、下段では、左のハートの白の縞が太く見え、右のハートの黒の縞が太く見えるが、縞の幅は白と黒で同じである。

1.2. 並置混色変換とムンカー錯視の連続性

ある図形を並置混色変換し、さらにある変換を加えることで、ムンカー錯視図形を生成することができる。図 14 にその手法を示した。

白い背景にマゼンタ色のハートの画像を考える。それを RGB 加法混色の並置混色画像に変換すると、背景は RGB の縞となるとともに、ハートは R と B の縞となる（G の部分は黒）。

ここで、R と G の縞を加法混色で統合すると、背景は Y（黄）と B（青）の縞となり、ハートは R（赤）と B（青）の縞となる。

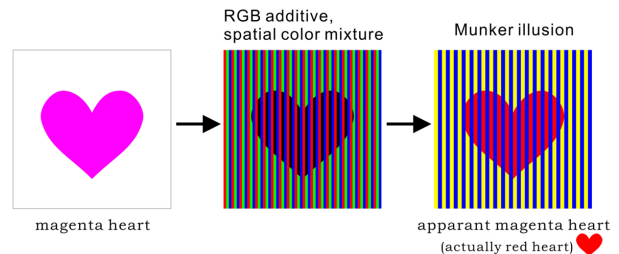


図 14 白い背景にマゼンタ色のハートを RGB 加法混色で並置混色変換して、R と G のサブピクセルを統合すると、図 12 左上のハートと同様のムンカー錯視図形が得られる。すなわち、「赤いハートがマゼンタ色に見える」という錯視の構図となる。

同様のやり方で、多くのムンカー錯視図形を並置混色変換によって作り出すことができる。図 15 は加法混色、図 16 は減法混色による変換である。これらから、並置混色とムンカー錯視の連続性が強く示唆される。筆者の仮説は、「ムンカー錯視は並置混色の知覚メカニズムの副産物」である。

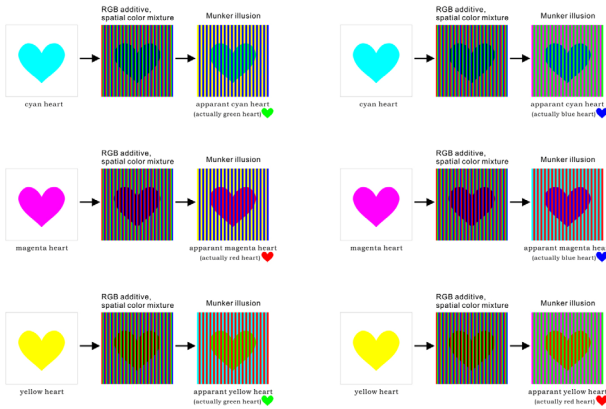


図 15 加法混色の並置混色とムンカー錯視の連続性。白地にシアン色のハートは、緑あるいは青のハートを用いたムンカー錯視図形に変換できる。白地にマゼンタ色のハートは、赤あるいは青のハートを用いたムンカー錯視図形に変換できる。白地に黄色のハートは、緑あるいは赤のハートを用いたムンカー錯視図形に変換できる。

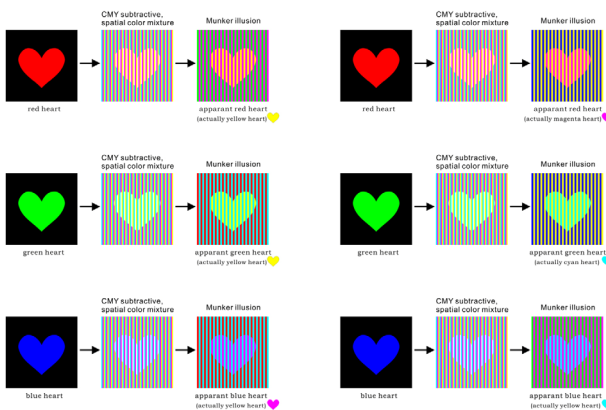


図 16 減法混色の並置混色とムンカー錯視の連続性。黒地に赤のハートは、黄色あるいはマゼンタ色のハートを用いたムンカー錯視図形に変換できる。黒地に緑のハートは、黄色あるいはシアン色のハートを用いたムンカー錯視図形に変換できる。黒地に青のハートは、マゼンタ色あるいはシアン色のハートを用いたムンカー錯視図形に変換できる。

1.3. この考え方では説明できないムンカー錯視

図 14~16 で示したアイデアによって、ムンカー錯視図形の半分については、並置混色の副産物として説明できる。たとえば、図 12 左上の赤が

マゼンタ色（明るい赤紫色）に見えるムンカー錯視は、図 14 のように並置混色と等価であると主張できる。しかし、図 12 右上の赤がオレンジ色に見えるムンカー錯視は、うまく説明できない。なぜなら、普通のオレンジ色のハートを並置混色変換することでは、どうしても図 12 右上のような色のハートを作れないのである。オレンジ色のハートは、黄色と明るくてやや彩度の低いマゼンタ色の縞模様のハートでしか等価とならない（黄色と赤色の縞模様には変換できない）（図 17）。

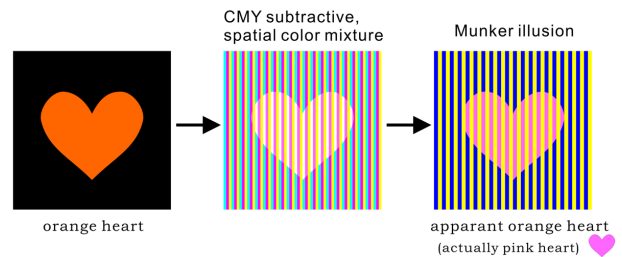


図 17 オレンジ色 (R255, G102, B0) のハートの図形を並置混色変換した場合、明るくてやや彩度の低いマゼンタ色 (R255, G102, B255) のハートで置換される。図 12 右上のような赤 (R255, G0, B0) にはならない。

すなわち、ムンカー錯視を並置混色の副産物と考えるのであれば、ムンカー錯視の画像に対応する「原画像」があると考えたいところであるが、例外があるというわけだ。図 17 に示したように、単色のオレンジ色は、周囲を黄と青の縞のムンカー錯視にする場合、黄色と明るくてやや彩度の低いマゼンタ色の縞で置換される。図 12 右上のハートのオレンジ色は黄色と赤色の縞なのだから、後者は前者よりも「平均彩度」が高いというべきである。すなわち、そこで知覚されるオレンジ色は、普通の単色のオレンジ色よりも彩度が高いという可能性がある。理屈だけでなく、見た目もそう見える。図 18 にいくつか例を示した。

これらの例外の意味するところを考察してみたい。まず、ムンカー錯視の半分の例を説明できないことから、「ムンカー錯視の並置混色副産物仮説」は妥当ではないという可能性はある。

しかし、既に触れたように錯視で得られた色が単色よりも彩度が高く見える（ディスプレイや印刷の色域外の色に見える）ことから、並置混色の知覚のメカニズムの枠組みの中にムンカー錯視は位置しているものの、ディスプレイや印刷の色域内には存在しないあざやかな色を副産物として生成する場合がある、という可能性も考えられる。今後のさらなる検討が待たれる。

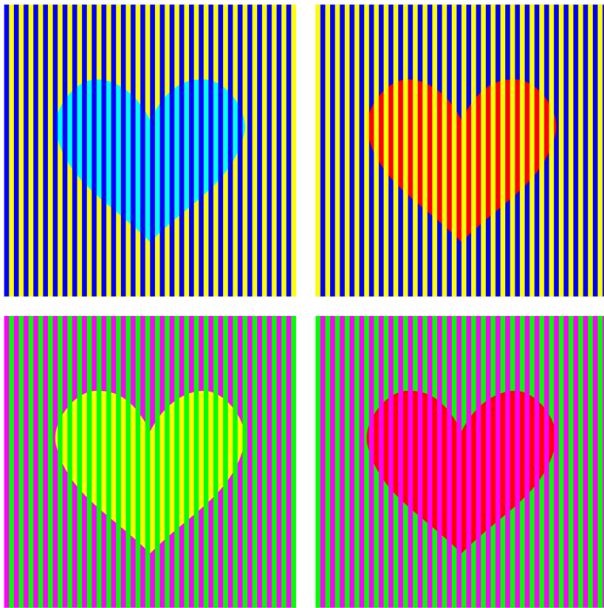


図 18 単色には対応する色が見当たらない、あざやかな色が知覚されるムンカー錯視の色配置の例。

14. おわりに

この論考は、ネオン色拡散⁴⁾⁵⁾などの補完現象(図 19、図 20)にまで及ぶものと筆者は考えており、黄ばみ効果(図 11、図 21)についてもさらに論じたいが、長くなるので詳細は別稿に譲る。

本稿の主張するところは、(1) 並置混色には加法混色と減法混色が区別できること、(2) それらはムンカー錯視と密接な関係があると考えられる、という 2 点である。

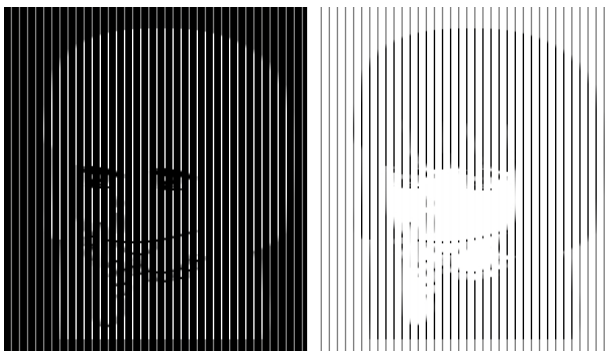


図 19 ネオン明るさ拡散を表現した図。左の髪と服は白く見え、右のそれらは黒く見えるが、平均輝度としては左は右よりも低い。それぞれ図 8 左の黒線と図 8 右の白線を太くしたものに相当する。

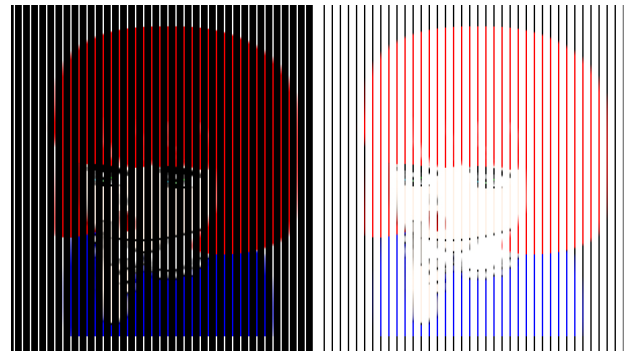


図 20 ネオン色拡散を表現した図。赤い髪や青い服は、狭い線上に描かれているのであるが、左図では黒いギャップ、右図では白いギャップを、輪郭と色が渡っているように見える。

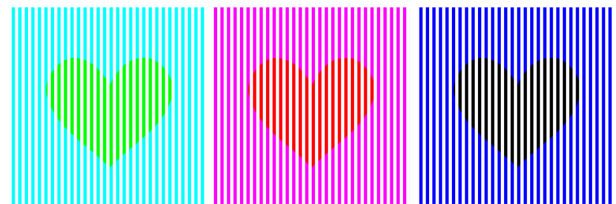


図 21 黄ばみ効果の例。それぞれのハートに黄色味が知覚されるが、ギャップはすべて白である。左から右に、外側の色縞は、シアン、マゼンタ、青で、ハート内部の色縞は、緑、赤、黒である。

参考文献

- 1) X. Li, & A. Gilchrist: Relative area and relative luminance combine to anchor surface lightness values, *Perception & Psychophysics*, 61 (1999) 771–785
- 2) H. Munker: *Farbige Gitter, Abbildung auf der Netzhaut und übertragungstheoretische Beschreibung der Farbwahrnehmung*. Habilitationsschrift, Ludwig-Maximilians-Universität, München (1970)
- 3) M. White: A new effect on perceived lightness, *Perception* 8 (1979) 413–416
- 4) D. Varin: Fenomeni di contrasto e diffusione cromatica nell'organizzazione spaziale del campo percettivo, *Rivista di Psicologia*, 65 (1971) 101–128
- 5) H. F. J. M. Van Tuijl: A new visual illusion: Neonlike color spreading and complementary color induction between subjective contours, *Acta Psychologica* 39 (1975) 441–445