

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12022

研究課題名（和文）色対比と色同化の切り替えを決定づける微細な輝度手掛かりに関する研究

研究課題名（英文）Luminance cues switching between color contrast and color assimilation effect

研究代表者

鯉田 孝和（Koida, Kowa）

豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・准教授

研究者番号：10455222

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：色対比と色同化は色覚の基本特性である。我々が近年発見した錯視「細い灰色線を白い細線でふちどると背景からの色対比が強まる」は、色覚の空間特性を理解するのに役立つ。本研究では錯視の最適条件の探索ならびに、発生要因のメカニズム解明を目指して心理実験ならびに眼光学シミュレーションを行ったものである。一様背景色の下での最適条件は、細い灰色線に細い白いふちどり線を配置するものである。特に赤緑（LM錐体軸）の背景色では線幅が1.5/60度と極めて細かった。眼光学シミュレーションとの差分を取ることによって神経要因による色対比効果が求まり、中央周辺拮抗型の空間構造が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

色は物体を認識するための重要な手掛かりである。色覚の基本特性である色対比と色同化は、差分を強調したり平均化する情報処理に対応する。さらに非常に細かい線に対しては両者に加えて輝度情報をもとに色を推定する仕組みがあるようだ。これらの仕組みを理解するためには、我々が近年発見した錯視「細い灰色線を白い細線でふちどると背景からの色対比が強まる」が役立つだろう。詳細な調査を通じて、錯視の空間特性が定量的に求まった。本錯視は空間的に細かい画像で顕著であり、近年の高解像度ディスプレイの色再現に重要な知見となる。

研究成果の概要（英文）：Color contrast and color assimilation are fundamental properties of color vision. The illusion we have recently discovered, in which the color contrast from the background is enhanced when a thin white contours flanked a thin gray line, is useful for understanding the spatial characteristics of color vision. In this study, we conducted psychological experiments and optical simulations to find the optimal conditions for the illusion and to elucidate the mechanism. The optimal condition under the uniform background color is a thin gray line with a thin white border. Especially in the red-green (LM cone axis) background color, the line width was extremely thin (1.5/60 degrees). By differencing with optical simulations, the color contrast effect due to neural factors was obtained, revealing a central-surround antagonistic spatial structure.

研究分野：視覚心理物理学

キーワード：視覚 色覚 知覚 心理物理学 色収差 眼光学 シミュレーション 錯視

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

色の見えは周辺刺激の影響を受ける。そのような空間的作用で基礎となるのは色対比と色同化である。色対比とは、中心領域が背景領域の色に影響され補色が誘導される現象で、コントラスト強調に相当する(図1左)。色同化とは、背景領域と同じ色が誘導される現象で、平均化処理に相当する(図1中)。色対比と色同化は互いに逆の効果であり、どちらの効果が現れるかは刺激に依存する。第一に、誘導領域と被誘導領域との輝度コントラストが小さいと色対比が強まり、輝度コントラストが大きいと色同化が強まる(キルシュマンの法則; Kirschmann, 1891; Gordon and Shapley, 2006)。第二に、刺激が細かい場合には色同化が強まり、粗い場合は色対比が強まる(Smith & Pokorny, 2001)。

色同化と色対比は同時に生じて互いにキャンセルしたり、逆に相乗効果を起こすことがある。細かい刺激で生じやすい色同化は、空間的に近傍での作用と考えることができる。また粗い刺激で生じやすい色対比は空間的に遠隔からの作用と考えることができる。つまり一様な背景から中央の非誘導領域への影響は、近傍からの色同化と、遠方からの色対比という二つの効果があり、それらは互いにキャンセルして色の見えの変化を弱めている。また一方で、近傍に色を配置し、遠方にその補色となる色を配置すると(例えば近傍に紫、遠方に黄緑とすると; 図1右)、被誘導領域には近傍と遠方からの効果が協調しあって同じ色が誘導されることになる(紫の色同化で紫色、黄緑の色対比で紫色)。その結果、極めて強い色変化が知覚される(モニエ錯視、ムンカー錯視、Monnier & Shevell, 2003)。

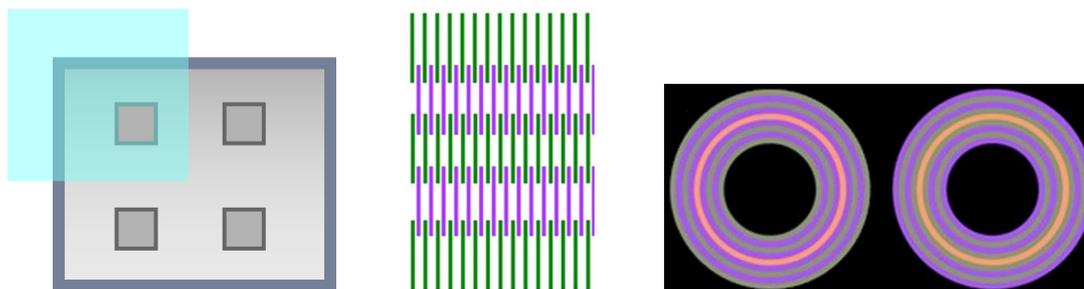


図1: (左)色対比の例。左上の正方形だけ赤く見えるが、4個の正方形は同じ灰色である。周辺のシアン色の補色の赤が誘導されている。(中央)色同化の例。紫の縞の間隙は薄紫に見え、緑の間隙は薄緑に染まって見えるが、どちらも背景は白色である(Sohmiya, 2007)。縞と同じ色が誘導されている。(右)近傍の色同化と遠隔色対比が協調的に働くモニエ錯視(Monnier & Shevell, 2003)。左右の中央リングは同じ色である。

ここで、二つの疑問が生じる。近傍から色同化、遠方から色対比が生じるとして、これは古典的に知られている輝度依存性とのような関係にあるのだろうか。等輝度で色対比が起きやすいという経験則は一様な背景を前提としており、近傍と遠方の効果を切り分けていない。つまり古典的な輝度コントラスト依存性は、近傍色同化と遠方色対比のどちらに依存していたのかが明らかでない。輝度コントラスト依存性は近傍色同化にも、遠方色対比にも存在するのだろうか?あるいはどちらか一方にのみ生じているのだろうか?

二つ目の疑問は、近傍と遠方に異なる色を配置して生じる強力な色誘導効果が、青黄軸方向に対しては強く生じるのに対して、赤緑軸方向に対してはほとんど起きないか、生じても弱いことである(McCamy, 2003; Lin et al., 2010; Cerda-Company et al., 2018)。網膜や脳での視覚情報処理を考えると、空間的対比はどの色に対しても生じるはずである。赤緑刺激に対して何か適切な条件があれば強力な色誘導効果が得られるのだろうか?

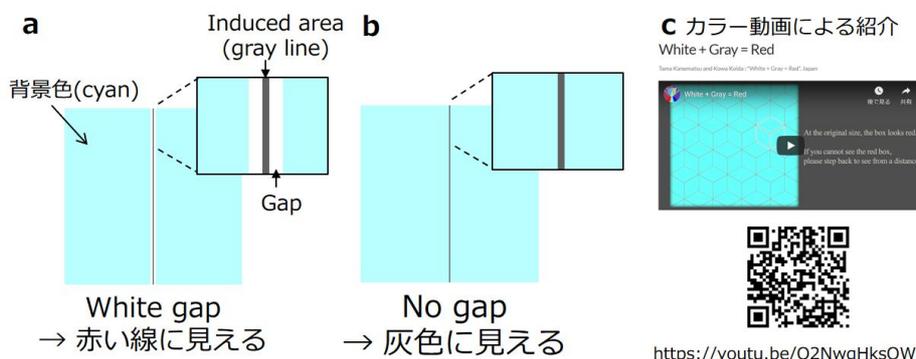


図2: 発見した色錯視の紹介 (a) 白い輪郭でふちどった灰色の線は背景色から強い色対比を起こす。背景がシアン色の場合、赤い線に見える。(b)輪郭が無い場合は灰色に見える。(c)カラーバージョンの錯視の動画は上記のURL (QRコード)から見る事ができる (Kanematsu & Koida, 2018, Illusion contest of the year 2018)。

ここで、近年われわれが発見した色対比錯視が手掛かりとなることに着目した(図2)。本錯視は、色づいた背景上に細い灰色線(被誘導領域)があり、その境界を白い輪郭でふちどったものである。白い輪郭の有無で、色対比が著しく変化するという点に特徴がある。線は細いほど良く、輪郭は白くて背景より明るい方が良い。灰色線の輝度は輪郭より暗ければ何でも良く、輝度に依存せず対比が生じるようである。錯視の発生機序は上述のモニエ錯視と似ており、遠隔からの色対比が主要因と思われる。ただし、デモが示す通り赤色が誘導されており、これまで弱いと考えられてきた赤緑軸上において強く生じる点が異なる。また、本錯視は紹介動画として紹介され、Illusion contest of the year 2018のTop 10 finalistとしてノミネートされた。

## 2. 研究の目的

本研究では、新しく発見された錯視の効果を心理実験により定量化し、(1)色変化が被誘導領域の輝度に応じてどのように変わるのか、近傍に白い輪郭がある場合と無い場合とで比較し、近傍と遠方の効果の輝度依存性を明らかにする。(2)既知の青黄軸に沿った錯視効果と、新規の赤緑軸に沿った効果でどのような条件の違いがあるのか、線の幅を変えることでそれぞれの最適条件を探す。さらに、(3)細かい線で顕著となる眼でのボケや色収差とどのような関係があるのか、光学測定ならびに眼光学シミュレーションを用いて、光学要因と神経要因を切り分ける。

## 3. 研究の方法

実験1では、錯視の要因である輪郭線の効果を調査するために、白色輪郭、黒色輪郭、輪郭無しとの3条件で色の見えを比較した。錯視による色の見えはマッチング法により測定した(図3)。錯視画像であるサンプル刺激を見て、並置した比較刺激(ただし周辺は一樣白色)の中心線の色を操作することで色の見えをマッチングした。マッチングは色と輝度の両方を操作できる。実験2では、様々な線幅の錯視画像を見て、同じ見えに相当する色サンプルをパレットから選択した。パレットは色のみ変化する。

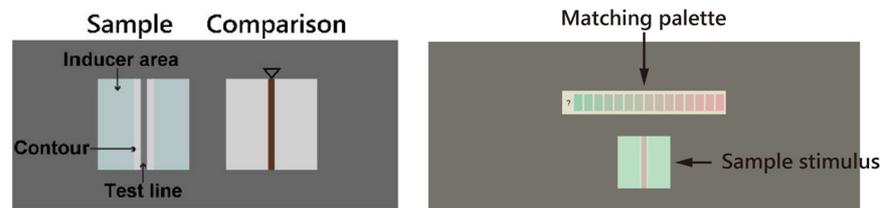


図3: 実験方法と刺激の外観。(左)実験1、(右)実験2。

## 4. 研究成果

実験1の結果、輪郭線の有無および輝度によって色の見えは大きく変化し、さらに灰色線の輝度を変えた場合の色対比への影響は、縁取りの有無によって大きく異なった(図4左)。白く縁取ると灰色線の輝度によらず色対比が生じ、特に暗い輝度で効果が顕著であった。これは、本研究によって初めて明らかになった特性である。一方で縁取りを無くすと、概して色対比は弱まり、灰色線の輝度が背景色の輝度に近い場合のみ色対比効果が現れた。これは既知のキルシュマンの法則と一致する。

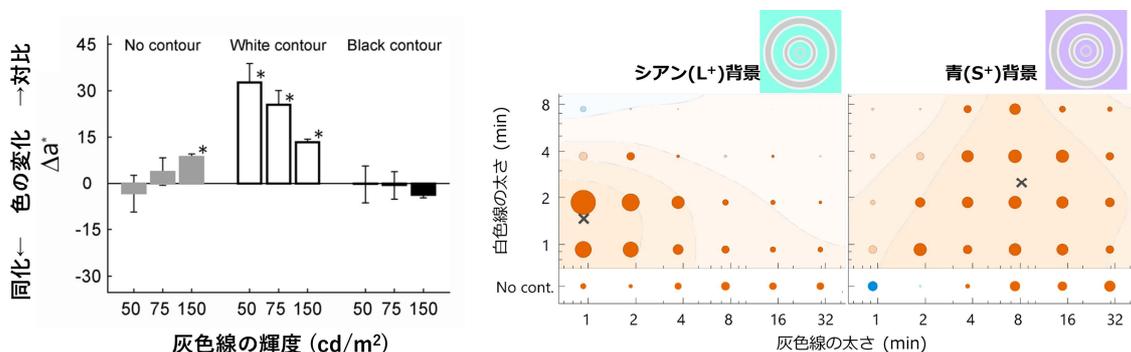


図4: 実験結果。(左)実験1の結果。バーが高いほど色対比に相当する。輪郭無では色対比効果は弱く、背景との輝度コントラストが低い150cd/m<sup>2</sup>でのみ生じていた。白輪郭では概して色対比が強かった。黒輪郭では色は変化しなかった。(右)実験2の結果。灰色線の太さと白輪郭の太さをそれぞれ変えた際の色対比効果をバブルで示す。バツ印は補間で求めた最適線幅。シアン(青)の最適線幅は青より数倍細かった。

次に眼光学系に由来する散乱や色収差を理論で予測するとともに、実際の光学系とカメラを用いて錯視画像がどのように変化するか計測した。その結果、どの刺激画像においても色同化に相当する作用がほとんどであり、錯視で生じるような色対比効果は生じないことが分かった。ま

た、固視点を奥行き方向に移動させることで被験者の眼で色収差が生じやすい状況を作り出し、錯視画像を観察させた。実験の結果、色収差による効果を加味したうえでも錯視による色変化が強いことを実証した。これは錯視が光学効果ではなく神経メカニズムに由来することを示す。以上の結果は論文発表された(Kanematsu and Koida, 2020, Scientific reports)。

実験2の結果、赤緑(LM錐体色)背景では灰色線および白輪郭の線幅が2分(2/60度)弱のときに錯視効果が最大であることを見出した(図4右)。視野角2分とは、中心窩付近での錐体3個程度の細かさである。一方で青黄(S錐体色)背景では、少し太い視野角3分~8分であった。つまり、LM錐体方向で錯視効果を起こすにはS錐体色方向に比べて数倍細かい刺激を用いる必要があった。眼光学的要因による散乱と色収差をモデル計算により求めた結果、どの色条件であっても背景と同じ方向への色シフトを起こした。あらためて錯視は神経要因で生じていることが確認された。以上の結果は論文発表された(Kanematsu and Koida, 2022, Frontiers in Psychology)。

実験1の結果より、遠方からの色対比は輝度コントラストに依存せず生じることが分かった。つまり、古典的な一様背景の下で見られた色対比の輝度コントラスト依存性(キルシュマンの法則)は、近傍からの色同化の輝度依存性を反映した可能性が高い。実験1, 2を通じて、本錯視によって誘導される色は赤緑方向(LM錐体軸)においても顕著に生じることが明らかとなった。LM軸背景とS軸背景間の最適線幅の違いは、生理学的な色相ごとの空間解像度の違いを反映していると考えられる。どちらの最適線幅もそれぞれの色相の空間分解能の上限と一致するからである。さらに、黒輪郭では生じず、白輪郭が必要なことを考えると、非常に細かな領域では適切な輝度信号により色の見えが大きく影響を受けることを示唆している。これはヒトが非常に細かなものの色を見分けるために必要な機能かもしれない。

現在のディスプレイやスマートフォンは非常に細かい解像度で映像を表示できる。そのような高精細な画像表示は、本研究で示した細かい線での色錯視に相当する現象が生じる可能性がある。今後、本錯視を説明する計算モデルが提唱できれば、視覚神経機能の理解に繋がるとともに、テキスタイルなどの産業デザインや、高精細化されるデジタル機器の画面デザインにおいてユーザーが受け取る印象を推定するのに役立つだろう。

## 引用文献

- Kirschmann, A. Ueber die quantitativen Verhältnisse des simultanen Helligkeits- und Farben-Contrastes. Philos. Stud. 6, 417–491 (1891)
- Gordon, J. and R. Shapley (2006). "Brightness contrast inhibits color induction: evidence for a new kind of color theory." *Spat Vis* 19(2-4): 133-146.
- Smith, V. C., P. Q. Jin and J. Pokorny (2001). "The role of spatial frequency in color induction." *Vision Res* 41(8): 1007-1021.
- Monnier, P. and S. K. Shevell (2003). "Large shifts in color appearance from patterned chromatic backgrounds." *Nat Neurosci* 6(8): 801-802.
- Sohmiya, S. A wave-line colour illusion, *Perception*. 36 (2007) 1396–1398.
- McCamy, C. S. (2003). "Colors of some small figures on colored grounds." *Color Research & Application* 28(4): 242-250.
- Lin, Y. J., C. C. Chen and S. H. Chien (2010). "The Munker-White effect and chromatic induction share similar nonlinear response properties." *Seeing Perceiving* 23(3): 223-240.
- Cerda-Company, X., X. Otazu, N. Sallent and C. A. Parraga (2018). "The effect of luminance differences on color assimilation." *J Vis* 18(11): 10.
- Kanematsu, T. and K. Koida (2020). "Large enhancement of simultaneous color contrast by white flanking contours." *Sci Rep* 10(1): 20136.
- Kanematsu, T. and K. Koida (2022). "Influence of Stimulus Size on Simultaneous Chromatic Induction." *Front Psychol* 13: 818149.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kanematsu Tama, Koida Kowa	4. 巻 13
2. 論文標題 Influence of Stimulus Size on Simultaneous Chromatic Induction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 818149
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2022.818149	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ohara Masakazu, Kim Juno, Koida Kowa	4. 巻 13
2. 論文標題 The Role of Specular Reflections and Illumination in the Perception of Thickness in Solid Transparent Objects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Psychology	6. 最初と最後の頁 766056
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpsyg.2022.766056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kanematsu Tama, Koida Kowa	4. 巻 10
2. 論文標題 Large enhancement of simultaneous color contrast by white flanking contours	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 20136 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-77241-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ohara Masakazu, Kim Juno, Koida Kowa	4. 巻 11
2. 論文標題 The Effect of Material Properties on the Perceived Shape of Three-Dimensional Objects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 i-Perception	6. 最初と最後の頁 6 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/2041669520982317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 吉川 真由、永井 翠、鯉田 孝和	4. 巻 60
2. 論文標題 概日リズムによる輝度コントラスト感度特性の変化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 生体医工学	6. 最初と最後の頁 158 ~ 163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11239/jsmbe.60.158	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計9件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 鯉田孝和, 平等裕也, 木村真大
2. 発表標題 青色刺激による瞳孔径変化の抑制
3. 学会等名 日本視覚学会2021夏季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 磯村凌、鯉田孝和
2. 発表標題 色素濃度による色変化と等色相曲線の相関
3. 学会等名 日本視覚学会2020年夏季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊裕汰, 鯉田孝和
2. 発表標題 色残効のテスト輝度依存性は黄色で顕著
3. 学会等名 日本視覚学会2021年冬季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森本拓馬, 鈴木雅洋, 鯉田孝和, 福田一帆, 内川恵二
2. 発表標題 機械学習による色恒常性の成立に必要な学習条件
3. 学会等名 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木雅洋, 鯉田孝和, 福田一帆, 森本拓馬, 内川恵二
2. 発表標題 視環境光統制下で飼育された白色レグホンの色恒常性成立への照明条件の影響
3. 学会等名 日本視覚学会2020年夏季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田達郎, 鯉田孝和
2. 発表標題 同時色対比の平均輝度依存性
3. 学会等名 日本視覚学会2022年夏季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水彩効果の色相依存性と背景輝度依存性
2. 発表標題 辻 奈津美, 鯉田孝和
3. 学会等名 日本視覚学会2022年夏季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 時刻による色輝度コントラスト感度特性の改善
2. 発表標題 吉川真由, 永井 翠, 鯉田孝和
3. 学会等名 日本視覚学会2022年夏季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 概日リズムによる輝度コントラスト感度 特性の変化
2. 発表標題 吉川 真由, 永井 翠, 鯉田 孝和
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 測定装置及び測定方法	発明者 鯉田孝和、平等裕也	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-156959	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>White contours induce red hue  <a href="https://www.eurekalert.org/pub_releases/2021-02/tuot-wci020921.php">https://www.eurekalert.org/pub_releases/2021-02/tuot-wci020921.php</a>          Transparency reduces perception of the 3D shapes  <a href="https://www.eurekalert.org/pub_releases/2021-02/tuot-otr021021.php">https://www.eurekalert.org/pub_releases/2021-02/tuot-otr021021.php</a></p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------