

彩度分布を持った不均一領域間の色相の違いによる 形状弁別と色弁別の比較

永井 岳大・内川 恵二

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

〒 226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-G2-1

(受付：2006年8月8日；改訂稿受付・受理：2006年11月3日)

Comparison between Figure Discrimination and Color Discrimination by Hue Differences of Multi-colored Regions with Saturation Distributions

Takehiro NAGAI and Keiji UCHIKAWA

Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Nagatsuta-cho 4259-G2-1, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8502

(Received 8 August 2006; Received in revised form and accepted 3 November 2006)

The visual system can segregate a figure from the background by grouping similar colors. Chromatic characteristics of figure segregation have not been fully investigated as compared with those of uniform color discrimination. In this study, we investigated differences in chromatic characteristics between figure segregation and color discrimination. The stimulus was a multi-colored texture composed of random shape pieces. It was divided into two regions, the test region and the background region. The chromaticities of the test and background regions distributed on isoluminant lines, which started at the origin in the DKL color space. These isoluminant lines varied in hue direction. The chromaticity distributions of the test and the background regions were the same in saturation. We measured hue difference thresholds between the test and background regions for figure segregation and for color discrimination. In threshold measurement for figure segregation, the observer judged whether two test region figures were identical. In the results, both thresholds of figure segregation and color discrimination for all color directions increased as the saturation distribution increased. These results suggest that figure segregation and color discrimination were not conducted performed by the cone-opponent mechanisms. Properties in hue difference for figure segregation and color discrimination thresholds were found different in the similar manner between observers. These hue property differences imply that there exist some factors effective in hue in a certain level from color discrimination to figure segregation.

1. はじめに

色情報の役割として、物体の弁別・検出、物体形状の抽出、物体認識などがある¹⁾。これらの役割の中で色による検出や弁別を調べた心理物理実験に関しては、これまで多くの報告がなされ、弁別・検出に錐体以降の3つの cone-op-

ponent チャンネルが重要な役割を果たすことが示されてきた²⁻⁴⁾。さらに最近では、cone-opponent チャンネルよりも高次な色覚メカニズムが弁別・検出へ関与していることを示唆する報告も増えてきている⁵⁻⁹⁾。

Li and Lennie (1997)⁵⁾ は異なる色分布を持つテクスチャ領域間の弁別実験を行った。彼らは

領域弁別において信号（背景とターゲットの色分布の平均値のずれ）に対するノイズ（背景とターゲットのどちらにも含まれる一次元ガウシアン色分布）の効果が色空間内の方位に依存しているかどうかを調べた。その結果、L-M 軸と輝度軸からなる平面内で刺激が定義された場合の領域弁別は、L-M 方向と輝度方向に選択性のある2つのメカニズムで説明可能であった。しかし、刺激が等輝度平面内で定義された場合は cardinal 方向²⁾（cone-opponent チャンネルに対応する、L-M, S-(L+M)方向）に選択性のある2つのメカニズムだけでは説明できず、non-cardinal 方向に感度のある2つのメカニズムを加え、全部で少なくとも4つのメカニズムを仮定しないと説明できなかった。この結果から、彼らは等輝度平面では独立な cone-opponent チャンネルよりも高次の色覚メカニズムが領域弁別に関与することを示唆した。

Sankeralli and Mullen (1999)⁶⁾ は、灰色背景中に時間的に連続して呈示される単色の閾上刺激（背景に対し閾上の彩度を持つ刺激）間の色弁別特性を調べた。彼らは様々な色相の参照刺激から色空間内の各方向へ色弁別閾値を測定し、等輝度平面上にプロットした。色弁別閾値は参照刺激を中心とした楕円を描き、参照刺激の色相にかかわらず、閾値楕円の長軸方向は参照刺激の彩度方向と一致した。参照刺激の色相が non-cardinal 方向にあった場合にも閾値楕円の長軸が参照刺激の彩度方向と一致するのは独立な cone-opponent チャンネルだけでは説明できない。したがって、様々な色方向に感度を持つ高次色弁別メカニズムの存在が示唆された。

また、彼らは様々な彩度の刺激を用いて色相弁別閾値の測定も行った。色相弁別閾値を cone-opponent 色空間内の距離により表現すると、刺激彩度が高い範囲においては閾値と刺激彩度が比例した。色相弁別閾値は刺激間の cone-opponent 空間における角度差により決まることが示された。さらに、実験刺激に時間的彩度変化を加えても色相弁別閾値に影響を与えなかった。これらの結果より、閾上刺激弁別メ

カニズムは色相と彩度を分離して処理していることが示唆され、色覚の比較的初期段階で色相と彩度が分離して符号化されている可能性が示された。

色の検出や弁別に関して多くの報告がある一方で、色による形状抽出特性については最近までほとんど報告がなかった。しかし、最近数年間で色による形状抽出特性に関する報告が見られるようになってきた。Mullen and Beaudot (2002)¹⁰⁾ は色度エッジによって作られたわずかに形状が異なる2刺激間の形状弁別実験を行い、色度エッジによる形状弁別も輝度エッジによる形状弁別と同様に hyperacuity レベルで可能であることを示した。この結果は色情報も形状知覚に重要な役割を果たすという考えを支持している。

Cardinal and Kiper (2003)¹²⁾ と Mandelli and Kiper (2005)¹³⁾ は、Glass パターン¹¹⁾を用いて形状検出における色覚特性を調べた。彼らは、Glass パターン形状検出のための処理は二段階にわかれ、ドットペアによる局所方向検出は第一段階で、局所方向情報の集約による Glass パターン形状検出は第二段階で行われるとした。そして、ドットペア内の色差とドットペア間の色差を操作することにより、各段階における色覚メカニズムの色相選択性を調べた。その結果、どちらの段階でも cardinal 軸は特別な特性を示さなかった。また、第一段階メカニズムは色相選択性に関して狭いバンド幅を持つこと、第二段階メカニズムは錐体応答を線形変換することにより得られる広いバンド幅を持つことが示された。

一方、Wilson and Switkes (2005)¹⁴⁾ も同様に Glass パターンを用いて形状検出を調べた。彼らの結果からは、等輝度 Glass パターン検出は輝度 Glass パターン検出と同程度に可能であるが、第二段階メカニズムにおいて色相選択性が失われていることが示された。Cardinal and Kiper (2003)¹²⁾、Mandelli and Kiper (2005)¹³⁾ と Wilson and Switkes (2005)¹⁴⁾ の研究では、実験に用いた Glass パターンの大きさやドット数

などの実験条件の違いはあるものの、特に方向情報統合段階の色度特性について大きく異なる結果が得られた。この原因は明らかではなく、これらの実験結果では個人差も非常に大きい。

本研究では、多色テクスチャ刺激を用いて、形状知覚を担う色覚メカニズムの色度特性を二種類の方法により調べることを目的とした。第一の方法では、類似の刺激を用いて形状知覚課題と色弁別課題を行い、それぞれの課題の結果から得られる色度特性を比較した。課題間の色度特性の差分から、形状知覚を担う色覚メカニズムを明らかにしていく。第二の方法では、刺激に色分布を加え、形状知覚と色弁別に対する色分布のノイズとしての効果を調べた。過去の色分布のノイズマスキングを調べた研究では、複数の色相にまたがる色分布を用いていたものが多い。本研究では、色分布としては彩度分布を用い、色相の違いによる形状知覚と色弁別に対する各色相方向のメカニズムの特性を調べる。各色相における彩度分布の影響の大きさから、各課題を行うために必要な色覚メカニズムの色度特性を明らかにする。

2. 実験 1 (形状弁別実験)

2.1 実験方法

2.1.1 装置

実験は全てコンピュータ (Power Mac G4, 450 MHz) で制御され、実験刺激はフレームレート 85 Hz の CRT (Nanao FlexScan T766) に呈示される。Cambridge Research System 社の Bits++ を介して刺激を呈示することにより、RGB 蛍光体はそれぞれ 14bit の階調で発色させることが可能となった。CRT の輝度と色度の較正は Topcon SR-2 により行った。

被験者は顎台によって頭部を固定され、暗室内で両眼視にて刺激を観察する。視距離は 57 cm である。

2.1.2 色空間

本研究では、刺激を定義する色空間として DKL 色空間^{15,16)}を採用する。DKL 色空間は Smith-Pokorny の錐体分光感度¹⁷⁾に基づく錐

体コントラスト空間の線形変換で表現される色空間であり、原点を灰色 (本研究では 20 cd/m^2 の等エネルギー白色とした) として、輝度、L-M、S-(L+M) という直交する 3 軸からなる。L-M 軸と S-(L+M) 軸から等輝度平面が構成され、それらの軸は cardinal 軸²⁾に対応する。DKL 色空間では各軸の尺度が任意であるため、各軸における原点から正負各方向への色検出閾値を予備実験により被験者ごとに測定し、正負の閾値の平均値を各軸の 1 単位の長さとした。

本論文内の輝度は全て CIE 標準比視感度関数 $V(\lambda)$ により計算された値を用い、各被験者に対して交照法などによる輝度補正は行っていない。また、LMS 錐体コントラストは CRT モニタを分光測光し Smith-Pokorny の錐体分光感度^{17,18)}と掛け合わせるにより計算される。

2.1.3 実験刺激

実験刺激の例を図 1a に示す。実験刺激はモニタの中央に呈示され、横 $96 \times$ 縦 60 個の小片から構成される多色テクスチャ刺激である。テクスチャのサイズは横 $27 \text{ deg} \times$ 縦 17 deg である。各小片は頂点位置がランダムな八角形であり、その平均的なサイズは $12.5 \times 12.5 \text{ min}$ である。小片間には灰色 (20 cd/m^2 の等エネルギー白色) の隙間があり、その幅は約 4 min である。テクスチャ刺激の周辺は小片間と同じ様な横 $34 \text{ deg} \times$ 縦 26 deg の灰色となっている。

テクスチャ刺激は図 1b のテトリスブロックと似た形状を持つ二つのテスト領域とそれ以外の領域である背景領域に分類される。テスト領域はテクスチャ内左右 2 か所の $8.5 \text{ deg} \times 8.5 \text{ deg}$ の範囲内に存在する。テスト領域の形状は $1.7 \text{ deg} \times 1.7 \text{ deg}$ の正方形を 4 つ組み合わせることにより作られ、図 1b に示すような 5 種類のテトリス状の形状のいずれかがランダムな方向に回転したものである。左右のテスト領域に異なった形状が呈示される場合には、2 つのテスト領域形状の組合せとして図 1b に示す隣り合う形状の組合せのみを採用する。

各領域内の色は図 1c に示すように DKL 色空間内の異なる色分布から選ばれる。各色分布は

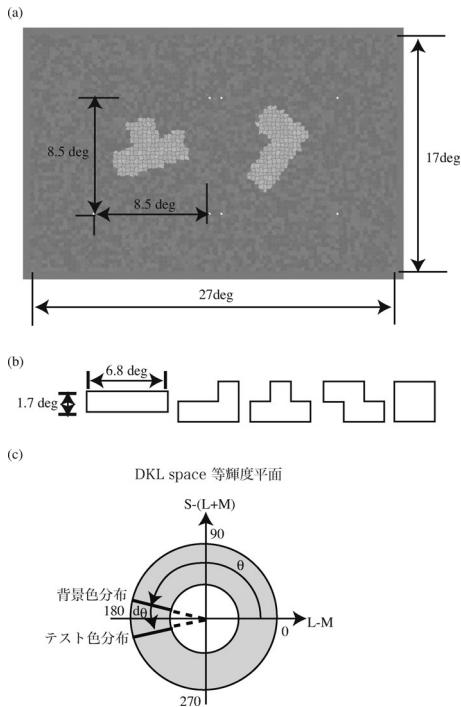


図1 (a) 実験刺激. テクスチャ刺激のうち, テトリス状の形状となっている領域がテスト領域, それ以外の領域が背景領域である. 実際に実験で使われた刺激では, テスト領域と背景領域の輝度分布は等しく色相のみが異なっていた. (b) テスト領域として用いられた形状. (c) テスト領域と背景領域の色分布. この図はコントラスト分布あり条件における色分布を示している (本文参照).

原点から伸びる等輝度平面上の線上にある一次元色分布である. したがって, 等輝度平面において, L-M 軸の正方向を 0° , S-(L+M) 軸の正方向を 90° として, 各色分布をおよそ色相に対応する色角度により分類することができる. 背景領域とテスト領域の色分布は色角度のみが異なり, 彩度 (等輝度平面上での原点からの距離) 分布は同一である. また, 輝度メカニズムの影響を小さくするため, 等輝度平面上の 1 次元分布に対し $-7.5 \sim 7.5$ 単位の範囲に様に分布する輝度分布を加えている. 本実験では, 形状知覚が可能となる背景領域とテスト領域の色分布角度差の閾値を求める.

背景分布の色角度として, $0 \sim 337.5^\circ$ まで 22.5° おきに全 16 種類の角度を用いる. また,

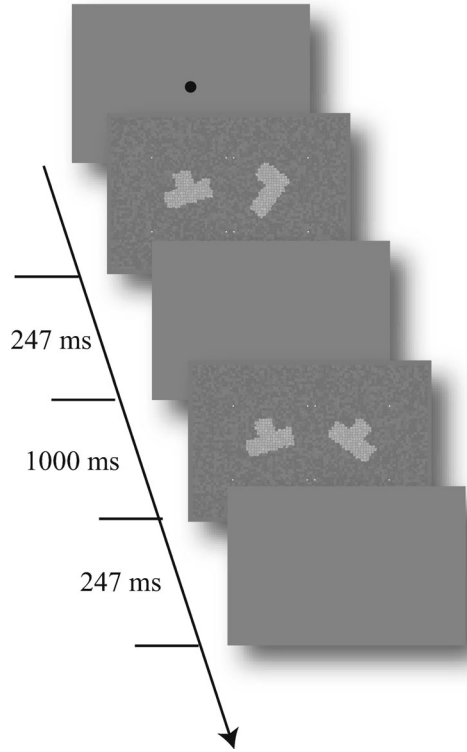


図2 1 試行の流れ. 試行開始時に固視点のみが呈示され, 被験者がボタンを押すとテクスチャ刺激が 2 度呈示される.

各背景色角度に対し, テスト色角度は背景色角度から正方向に等ステップ間隔で回転させた 9 種類を用いる. ステップ間隔は被験者や実験条件により異なる.

刺激の彩度条件として, 彩度分布あり条件と彩度分布なし条件の 2 種類を用いる. 彩度分布なし条件とは, テスト領域と背景領域のそれぞれで色分布がなく単一の色度のみが用いられる条件である. 被験者 TN に対しては 15, 18.75, 22.5, 26.25, 30 単位の 5 種類, その他の被験者に対しては 15, 30 単位の 2 種類の彩度を用いる. 彩度分布あり条件では, 彩度に関して $15 \sim 30$ 単位の範囲の様な分布を持つ刺激が用いられる.

2.1.4 手続き

1 試行の流れを図 2 に示す. 1 試行のはじめに灰色 (20 cd/m^2 の等エネルギー白色) がモニタ全面に呈示される. 画面の中央に黒い固視点

(0.001 cd/m^2 の約 $4 \text{ min} \times 4 \text{ min}$ の四角形) を呈示し、被験者に試行開始を知らせる。固視点呈示後に被験者がボタンを押すと 247 ms ずつ 2 回テクスチャ刺激が呈示される。2 回の刺激呈示間には、モニタ全面に灰色刺激のみが 1 s 間呈示された。2 度呈示されるテクスチャ刺激のうち、どちらか一方では左右のテスト領域の形状が同じであり、もう一方では左右のテスト領域の形状が異なっている。刺激呈示後に、被験者は左右のテスト領域の形状が異なっていた刺激呈示回を 2IFC (2 Interval Forced Choice) で応答する。試行後に応答の正/誤はビーブ音により被験者に知らされる。刺激呈示前には被験者は固視点を固視したが、ボタンを押し刺激が呈示された後は自由に眼を動かすことができる。

1 セッションでは、彩度について 1 条件、背景色角度について全 16 条件の実験を行う。刺激呈示は階段法によって行われ、各背景色角度に対して、テスト色角度は 1-up 2-down ステップによって調節される。1 セッションでは各背景色角度に対し上下 1 系列ずつ行われ、各系列は 6 回折り返した時点で終了した。各彩度条件に対して 5 セッションずつ実験を行う。

実験から、各彩度条件と背景色角度条件において、各分布間角度差に対する正答率が得られる。それらの正答率に対しロジスティック回帰分析を行うことにより心理測定関数を当てはめ、正答率 75% に対応する分布間角度差を閾値とする。

2.1.5 被験者

被験者として色覚正常な 3 名の男性 (TN : 26 才, TF : 25 才, SN : 24 才) が実験に参加した。全員が心理物理実験の経験者であった。

2.2 実験結果

2.2.1 彩度分布の閾値におよぼす影響の予想

本実験では、刺激に彩度分布あり条件と彩度分布なし条件の 2 種類の条件を設定した。この 2 条件の実験結果を比較することにより、(1) 形状弁別が独立した cone-opponent チャネルの応答に基づいて行われるかどうか、(2) 形状弁別が色相と彩度を分離処理している色覚メカニズ

ムのみに基づいて行われるかどうかの 2 点を調べることができると考えられる。

はじめに、(1) 形状弁別が独立した cone-opponent チャネルの応答に基づいて行われると仮定する。ここで、(a) 背景色角度が cardinal 軸上である場合、たとえば 0° である場合と、(b) 背景色角度が cardinal 軸上にない場合、たとえば 45° である場合の 2 つの場合を考える。(a) 背景色角度が 0° である場合には、 0° からわずかに正方向に回転したテスト色分布と背景色分布の間では、等輝度平面において L-M 軸の値よりも S-(L+M) 軸の値において大きな差が生じるため、主に S-(L+M) チャネルの応答差に基づいて形状弁別を行わなければならない。また、彩度分布の影響を考えると、 0° の背景色角度に対して彩度分布は L-M 軸に沿った分布となるため、この分布は L-M チャネルに対してのみノイズとして働くことが予想される。したがって、形状弁別を行うために応答差をみるチャネルと彩度分布により応答差が生まれているチャネルが異なることから、彩度分布あり条件となし条件の結果にはほとんど差が出ないことが予想される。

一方、(b) 背景色角度が 45° である場合には、 45° からわずかに正方向に回転したテスト色分布と背景色分布の間には、L-M 軸の値と S-(L+M) 軸の値には同程度の差が生じ、L-M チャネルと S-(L+M) チャネルの応答差の何らかの足し合わせ情報に基づいて形状弁別が行われているはずである。また、彩度分布は L-M 軸と S-(L+M) 軸の値のどちらに対しても応答差を生むことから、L-M、S-(L+M) 両チャネルに対しノイズとして影響することが予想される。したがって、形状弁別を行うチャネルと彩度分布により応答差が生まれるチャネルが同じであることから、彩度分布なし条件に比べ彩度分布あり条件の閾値が高くなると予想される。これらの予想から、図 3a に示すように彩度分布が影響すると考えられる。このグラフの横軸は背景色角度である。縦軸は彩度分布あり条件の閾値を彩度分布なし条件の閾値で割ったものであ

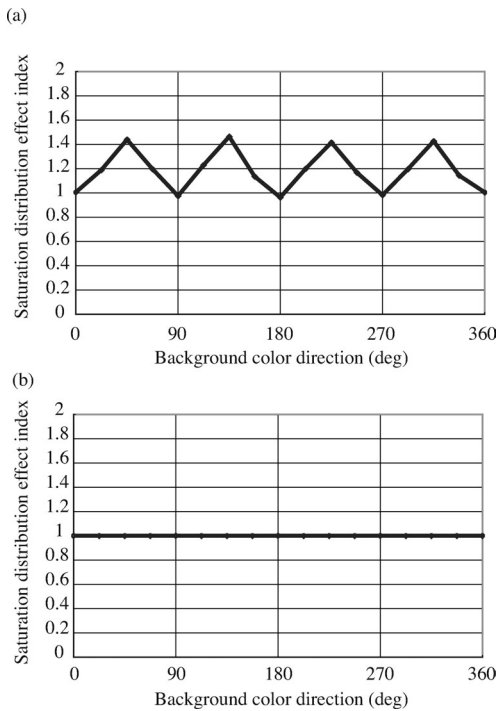


図3 (a) 形状弁別が cone-opponent メカニズムの応答に基づいていた場合に予想されるコントラスト分布の影響. 横軸は背景色角度, 縦軸はコントラスト分布あり条件の閾値をコントラスト分布なし条件の閾値で割った値である. (b) 形状弁別に基づく色覚メカニズムが彩度と色相を分離して符号化していた場合に予想されるコントラスト分布の影響.

り, 彩度分布の影響を示している. すなわち, 縦軸の値が1であるということは彩度分布の影響がないことを示し, 1より大きいということは彩度分布がノイズとして影響したことを示している. このグラフでは, 0, 90, 180, 270°では彩度分布の影響がなく, 45, 135, 225, 315°で彩度分布の影響が最大となっている.

次に, (2) 形状弁別が色相と彩度を分離処理している色覚メカニズムのみに基づいて行われると仮定する. 本実験で用いた課題は色相の変化のみで行われるため, 彩度分布なし条件と彩度分布あり条件の結果に差がないと考えられる. したがって, 彩度分布の影響として図3bのようなグラフが得られると予想される. 図3bは背景色角度によらず縦軸の値が1であり, 彩度

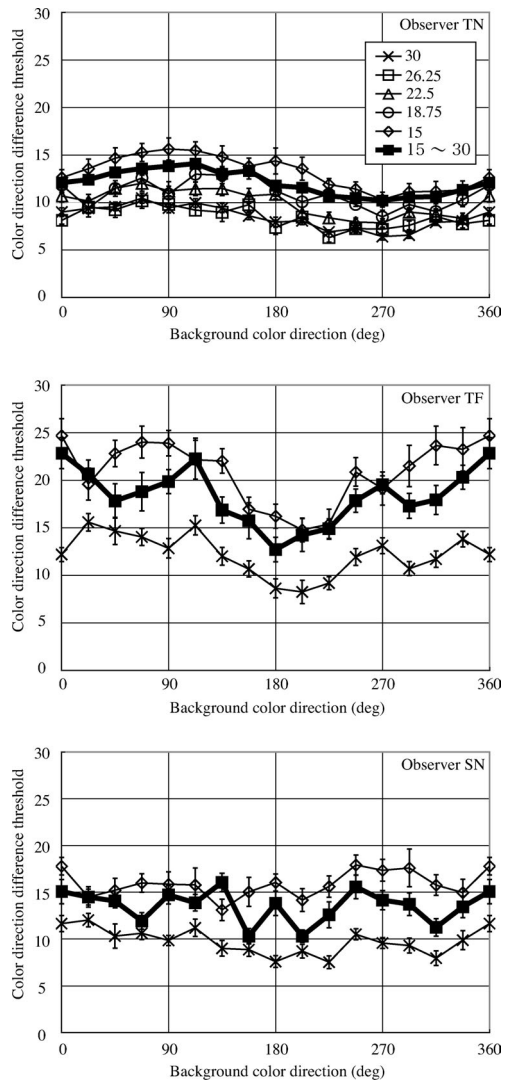


図4 形状弁別実験の結果. 横軸が背景色角度, 縦軸が背景色角度とテスト色角度の差の閾値である. グラフのシンボルは色コントラスト条件を, 誤差棒は ± 1 標準誤差を示す.

分布の影響がないことを示している.

2.2.2 閾値

全被験者の閾値を図4に示す. 横軸が背景色角度, 縦軸が背景色角度とテスト色角度の差の閾値である. グラフのシンボルと線は彩度条件を示す. 太い実線が彩度分布あり条件の結果であり, 細い実線が彩度分布なし条件の結果である. 細い実線の中で, シンボル×が彩度30の結果, □が26.25の結果, △が22.5の結果, ○

が 18.75 の結果、◇が 15 の結果である。誤差棒はロジスティック回帰分析により得られた ± 1 標準誤差である。各パネルが各被験者の結果を示す。

全被験者の結果において背景色角度により閾値が有意に変化している（全被験者で $p < 0.001$ ）。また、彩度分布なし条件の結果では、彩度が大きくなるにつれ閾値が小さくなっている（全被験者で $p < 0.001$ ）。これらの結果から、使用した cone-opponent 等輝度平面は検出閾値で正規化されているが、閾値は一定の分布間角度差や分布間ユークリッド距離となるわけではないことがわかる。被験者 TN の結果では、彩度分布あり条件の閾値はおよそ彩度 15 と 18.75 の閾値の間にあり、彩度分布あり条件の平均彩度である 22.5 の結果よりも閾値が大きい。他の被験者の結果でも、彩度分布あり条件の閾値は彩度 30 の閾値よりも 15 の閾値にかなり近い。これらの結果から、彩度分布がノイズとして閾値に影響したと考えられる。

2.2.3 彩度分布の影響

彩度分布の影響を詳しく調べるため、以下のように解析を行った。はじめに彩度分布なし条件の各背景色角度における閾値を彩度間で平均した。そして、各背景色角度において、彩度分布あり条件の閾値をこの平均閾値で除算し、その値を彩度分布の影響の指標（彩度分布効果指数と呼ぶことにする）とした。

図 5a に全被験者の彩度分布効果指数を示す。横軸が背景色角度、縦軸が彩度分布効果指数である。各シンボルは各被験者の結果を示す。誤差棒は各閾値の標準誤差にデルタ法¹⁷⁾を適用して得られた ± 1 標準誤差を示す。

全被験者の結果において、ほとんど全ての背景色角度で彩度分布効果指数が 1 を超えている。これより、彩度分布がノイズとして働き、閾値を増大させたことがわかる。また、全被験者の結果において、背景色角度と彩度分布効果指数の間に有意な交互作用がみられない。したがって、彩度分布の影響は背景色角度により変化しているとは言えない。

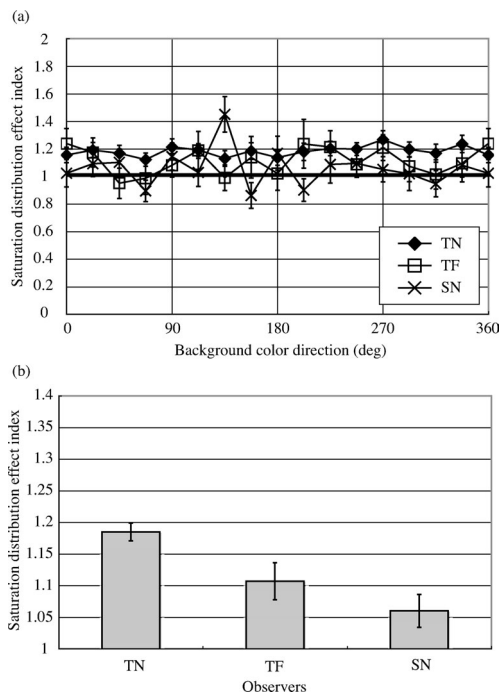


図 5 (a) コントラスト分布効果。横軸が背景色角度、縦軸が図 4 のコントラスト分布あり条件の閾値をコントラスト分布なし条件の閾値の平均で除算した値。(b) 背景色角度に対して平均したコントラスト分布効果。横軸が被験者を示す。

図 5b に背景色角度に関して平均した各被験者の彩度分布効果指数を示す。どの被験者の彩度分布効果指数も有意に 1 より大きく ($p < 0.01$)、彩度分布が閾値を増大させたことが確認された。

2.3 考察

全被験者の結果において、彩度分布が存在することにより全背景色角度に対するテスト色角度の閾値が同様に増大した。この結果は図 3 の a と b のどちらにも対応せず、形状知覚は cone-opponent チャネルの応答に基づいているとは言えないこと、そして形状知覚は色相と彩度を分離処理している色覚メカニズムのみに基づいて行われるとは言えないことがわかる。

彩度分布の影響は閾値を 1.1~1.2 倍にする程度であり、それほど大きくなかった。この原因の一つとして、彩度分布範囲が狭かったことが考えられる。彩度分布範囲を広くすれば、その

効果が本実験結果よりも大きくなると考えられる。ただし、ノイズマスキングを用いた色弁別に関する過去の研究^{5,9)}でも、色空間内において弁別すべき色方向とノイズ分布方向が直交しているときにはノイズ効果はかなり小さいという結果が得られている。したがって、本実験で彩度分布範囲を広くしても彩度分布効果指数はそれほど大きくなりえないかもしれない。

彩度分布の影響が小さかった原因として彩度分布なし条件の平均閾値と比較したことも考えられる。被験者TNの結果で彩度が大きくなるほど彩度による閾値間の差が小さくなっていることから分かるように、彩度と閾値はおおよそ反比例の関係にある。そのため、彩度分布なし条件において測定する刺激の彩度数が多いほどそれらの平均閾値は小さくなり、本実験で定義した彩度分布効果指数は大きくなると考えられる。この影響は彩度なし条件における彩度数が2種類しかない被験者TFとSNの結果で顕著であり、彼らが被験者TNと同じ彩度数の実験を行えば、もう少し強い彩度分布効果指数が得られたと考えられる。

同一彩度条件においても、背景色角度によって形状弁別閾値が変化し、その閾値変化特性には大きな個人差がみられた。L-M軸とS-(L+M)軸の相対的スケールリングによって、同じ色度の色もその色角度は変化するが、予備実験で測定した3名の被験者のL-M軸とS-(L+M)軸に沿った原点からの閾値の比にはほとんど差がなかったため、軸のスケールリングではこの個人差が生じたことを説明できない。この個人差の原因は明らかではないが、第3節で示すように色弁別閾値でも背景色角度による変化特性に個人差がみられるため、形状弁別閾値における個人差そのものが形状知覚特性だけの個人差を示すと考えerことは妥当ではないであろう。

3. 実験2 (色弁別実験)

3.1 実験方法

実験2では、実験1で用いられた刺激と類似の多色テクスチャ刺激を用いる。テクスチャの

大きさ、小片の数と大きさ、背景領域とテスト領域の色分布条件は実験1の刺激と全く同じである。ただし、テスト領域はテクスチャの左右どちらか一方に一つだけ存在する、 $4.2 \text{ deg} \times 4.2 \text{ deg}$ の正方形である。正方形の各辺はテクスチャ全体の辺と平行であり、実験1のようなランダムな方向への回転はない。

手続きも実験1とほとんど同じである。1試行のはじめに黒い固視点のみが呈示され、その後被験者がボタンを押すと247msずつ2回テクスチャ刺激が呈示される。2回の刺激呈示の間には灰色背景のみが1s間呈示される。2枚のテクスチャ刺激のうち、どちらか一方の刺激は左右どちらかにテスト領域を含み、もう一方の刺激はテスト領域がなく背景領域のみである。刺激呈示後に、被験者はテスト領域を含むテクスチャ刺激が呈示された回を2IFCで応答する。ロジスティック回帰分析により、正答率75%に対応する分布間角度差を閾値とする。実験1と同じ3名の被験者が参加した。

3.2. 実験結果

全被験者の閾値を図6に示す。グラフの見方は図4と同様である。実験1の結果と同様に、全被験者の閾値が背景色角度により有意に変化し(全被験者で $p < 0.001$)、彩度の増加に伴い閾値が小さくなった(全被験者で $p < 0.001$)。同じ被験者で比較しても、背景色角度による閾値変化傾向、すなわちグラフの形状は実験1の形状弁別実験の結果とは異なっている。実験1と同様に、背景色角度による閾値変化傾向には個人差が存在する。また、全被験者の結果で、彩度分布あり条件の閾値は彩度が15の場合の閾値よりも大きくなる背景色角度があり、彩度分布がノイズとして働いていたと考えられる。

図7aに図5aと同じ方法で求めた彩度分布効果指数を示す。グラフの見方は図5aと同様である。全被験者の結果において、ほぼ全背景色角度の彩度分布効果指数が1より大きい。また、全被験者の結果で、背景色角度と彩度分布効果指数の間に有意な交互作用がみられない。このことから、彩度分布効果指数は背景色角度

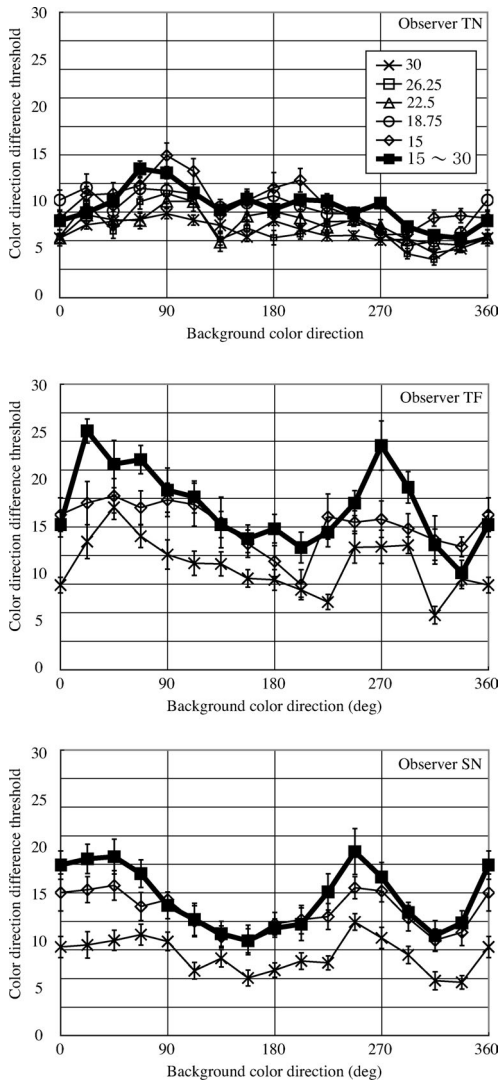


図6 色弁別実験の結果. グラフの見方は図4と同じである.

により変化しているとは言えない. 図7bに背景色角度について平均した彩度分布を示す. 全被験者の彩度分布効果指数が有意に1より大きく ($p < 0.001$), 彩度分布により閾値が大きくなったことが示されている.

3.3 考察

実験1の形状弁別実験と同様に, 彩度分布は全背景色角度の閾値を同程度増大させた. この結果から, 色弁別は cone-opponent チャネルの応答に基づいているとは言えないこと, そして色弁別は色相と彩度を分離処理している色覚メ

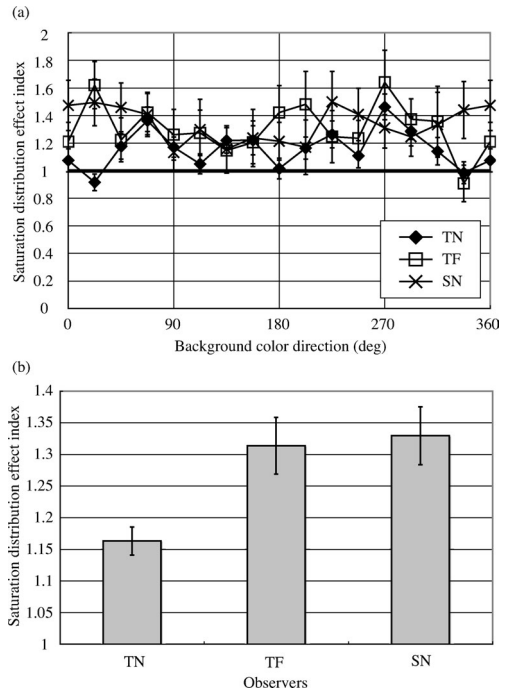


図7 (a) コントラスト分布効果. グラフの見方は図5(a)と同じである. (b) 背景色角度に関して平均したコントラスト分布効果.

カニズムのみに基づいて行われるとは言えないことが示唆される. また, 2.3節で述べたように, 被験者 TF, SN の結果については, 彩度分布なし条件における彩度数を増やすことにより, さらに彩度分布効果指数が大きくなるはずである.

形状弁別閾値と同様に色弁別閾値は背景色角度によって変化したが, その背景色角度による変化傾向は形状弁別閾値とは異なっていた. この違いは形状弁別と色弁別を担う色覚メカニズムの色度特性の違いを反映しているはずである.

4. 形状弁別閾値と色弁別閾値の比較

4.1 閾値の色相特性の比較

図4と図6のグラフを被験者ごとに比べると, 形状弁別閾値と色弁別閾値では背景色角度による閾値変化の傾向に違いがあることがわかる. この違いを定量的に調べるため, 各背景色角度において形状弁別閾値の色弁別閾値に対する比を計算した. 被験者 TN の結果を図8aに示す.

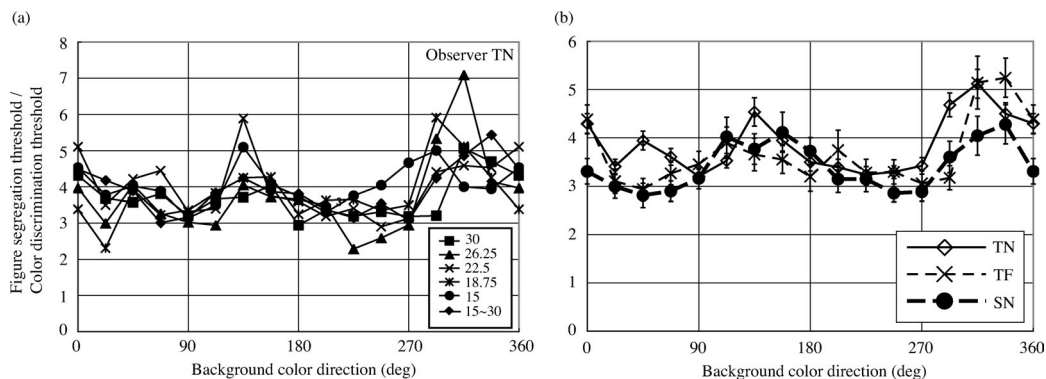


図 8 (a) 被験者 TN の色弁別閾値で正規化した形状弁別閾値. 各シンボルは各コントラスト条件に対応する. (b) 全被験者の色弁別閾値で正規化した形状弁別閾値. 全コントラスト条件について平均されている. 各シンボルは各被験者の結果に対応する. 誤差棒は ± 1 標準誤差である.

横軸が背景色角度, 縦軸が (形状弁別閾値 / 色弁別閾値) である. 各シンボルは各彩度条件 (彩度なし条件 5 種類と彩度あり条件) を示す. 全彩度条件において, 135° と 315° 付近に極大値があり, 類似形状のグラフになっている. 統計的にも背景色角度と彩度条件の間に有意な交互作用はみられない. したがって, 彩度条件によらず, 形状弁別閾値と色弁別閾値の色相特性の違いは一定であることがわかる.

図 8b に色弁別閾値に対する全被験者の形状弁別閾値の比を示す. この結果は全彩度条件において形状弁別閾値の比をそれぞれ計算した後平均した値である. 各シンボルが各被験者に対応し, 誤差棒は ± 1 標準誤差である. 全被験者の結果で 135° と 315° 付近に極大値があり, グラフ形状が類似していることがわかる. 形状弁別閾値と色弁別閾値では背景色角度による変化傾向の個人差が大きかったが, 形状弁別閾値を色弁別閾値で正規化することにより個人差がかなり小さくなるのである. この結果は形状弁別閾値と色弁別閾値の色相特性の違いに関しては個人差がほとんどないことを示す. 形状弁別閾値と色弁別閾値における個人差は色弁別を担う色覚メカニズムの色処理段階以前で生じている可能性が示唆される.

4.2 彩度分布効果指数の比較

図 5a と図 7a を比較すると, 全体的に形状弁別の方が色弁別よりも彩度分布の影響が少ない

ように見える. しかし, 被験者 TF と SN の結果では形状弁別の方が色弁別よりも彩度分布の影響が少ない. 彩度分布の影響量の違いも形状弁別と色弁別を担うメカニズムの色度特性の違いを反映しているはずである.

5. 総合考察

刺激に彩度分布を加えることにより, 形状弁別閾値と色弁別閾値はどちらも全背景色角度に関して同程度高くなった. たとえば, 被験者 SN の形状弁別閾値では背景色角度によって彩度分布の効果が少し異なるようにも見えるが, これは統計的に有意な変化ではなく, また少なくとも cardinal 軸に沿った変化はしていない. これらのことから, 両課題は独立した cone-opponent チャネルの応答に基づいて行われているわけではなく, また両課題が色相と彩度を分離処理する色覚メカニズムのみに基づいて行われるわけではないことが示唆される.

閾上刺激における色弁別閾値が独立した cone-opponent チャネルの応答だけでは説明できないことは過去に報告されているが^{6,7)}. 本研究の実験からはそれらの報告と一致した結果が得られた. また, ノイズマスキングを用いた過去の多くの研究も独立した cone-opponent チャネルだけでは色弁別実験の結果が説明できないことを報告している^{5,8,9)}. 色相と彩度を分離しているメカニズムではないことも考えると, 本

研究における形状弁別課題と色弁別課題を担う色覚メカニズムは、これらの過去の色弁別に關する研究から示唆されるように、ある色相範囲に感度のある皮質レベルのマルチプルチャンネルであろう。

一方、色弁別における色相と彩度の分離に關して Sankeralli and Mullen (1999)⁶⁾ が言及している。彼らは、複数の閾上刺激を時間的に離して呈示し、色相の違いによる色弁別閾値を測定した。その結果、彩度が高い刺激において、色弁別閾値はほぼ cone-opponent 空間内の角度差により決定され、またノイズとして時間的彩度変化を加えても閾値は変化しなかった。この結果から、彼らは閾上刺激色弁別メカニズムにおいて色相と彩度が分離されていると結論し、視覚系の比較的初期段階で色相と彩度が分離している可能性を示唆した。しかし、本実験結果では、色弁別実験でも形状弁別実験でも、空間的に彩度分布を加えた刺激では閾値が増大した。Sankeralli and Mullen (1999) の実験と本実験の大きな違いの一つは、弁別すべき刺激が時間的に離れているか、あるいは空間的に離れているか、という点である。本実験では空間的に隣接した領域の弁別であるため、たとえば空間構造を持った二重反対色受容野などの比較的低次元色覚メカニズムが関与しうると考えられる。一方、Sankeralli and Mullen の実験では時間的に 250 ms 離れた刺激間で弁別を行ったため、時間構造を持つ二重反対色受容野のような色覚メカニズムにより弁別を行うのは難しく、短期記憶のようなメカニズムに依存して弁別課題が行われたと考えられる。したがって、彼らが示唆した色相と彩度の分離は、閾上色弁別メカニズムの特殊な状況での特性ではないであろうか。

彩度分布の影響が cardinal 軸において特異な特性を示さず、全背景色角度において同程度であったという点では、形状弁別閾値と色弁別閾値は非常に似た性質を示した。しかし、彩度分布の閾値への影響は、被験者 TF と SN の結果では色弁別閾値の方が大きかった。もし形状弁別や色弁別がマルチプルチャンネルによって担わ

れているとするならば、各チャンネルの色相選択性のバンド幅や、マルチプルチャンネルが色情報を平均化する空間的サイズなどにより、彩度分布の影響量が変化するはずである。したがって、彩度分布の影響量の違いがこれらの色覚メカニズムの特性の違いを反映している可能性はあるが、本実験結果だけからそれらのメカニズム特性を抽出することは難しいであろう。

形状弁別閾値と色弁別閾値はともに背景色角度により変化したが、どちらも背景色角度への依存性(図4や図6のグラフ形状)に個人差がみられ、被験者間に共通の特性を見いだすのは難しかった。この個人差の原因として、DKL 色空間の各軸を各被験者の検出閾値により正規化したことや、cardinal 軸の向きの個人差²⁰⁾などが考えられる。特に cardinal 軸の個人差に關する Webster et al. (2000)²⁰⁾ の報告によると、6人の被験者の平均の S 軸の角度は 99.6° であり、標準観測者の角度から約 10° 正方向に回転していた。たとえば、標準観測者の cone-opponent 等輝度平面において描いた円は、この 10° 回転した S 軸を持つ被験者の cone-opponent 等輝度平面上においては 45-225° 方向の長軸を持つ楕円へ変換されてしまう。したがって、標準観測者にとって刺激間の色角度差を等しくしても、その被験者にとっては 45°、225° 付近では角度差が小さくなり 135°、315° 付近では角度差が大きくなる。さらに、S 軸が 10° 軸がずれていた場合、その角度差の比率は 2:3 ほどにもなる。被験者 TF や SN の色弁別実験の結果は 45° と 247.5° 付近に二つ極大値を持っていることから、この cardinal 軸角度の違いが結果に影響を与えた可能性は十分に考えられる。

一方、形状弁別閾値を色弁別閾値により除算すると、全被験者で共通した背景色角度依存性が得られた(図8)。被験者により cardinal 軸が異なっていた場合、各被験者の cardinal 軸が標準観測者の軸から 10° ずれることで大きく影響を受けるのは、前述したように形状弁別閾値と色弁別閾値の背景色角度への依存性である。本実験の背景色角度のサンプリングが 22.5° おき

であったことを考慮すれば、背景色角度への cardinal 軸のずれの影響はさほど大きくはなく、 10° 程度の軸のずれは大きな問題とはならない。したがって、この正規化形状弁別閾値の背景色角度依存性は、色弁別と形状弁別の色度特性の違いを示す重要な情報であろう。ここで問題となるのは、色弁別閾値と形状弁別閾値の間の色相特性の違いがどの段階で生じているのかという点である。形状弁別課題と色弁別課題の違いとして、必要な空間周波数特性や局所方向解析の必要の有無、方向情報集約の有無などがあると考えられる。

色覚は空間周波数に対し低域通過型の特徴を示す²¹⁾ため、色弁別よりも高空間周波数成分を解析する必要のある形状弁別の閾値の方が高くなることことが予想され、本実験結果もそれを支持した結果となっている。それぞれの課題を

行うのに必要な空間周波数成分を調べるため、実験でテスト領域の形状として用いたテトリス形状に対しフーリエ解析を行った。その結果を図9に示す。図9に示されている画像は、各テトリス形状に二次元FFTを行い、水平・垂直の両空間周波数成分に対し図9の最左列に示した空間周波数成分までのローパスフィルタをかけ、逆FFTを行うことにより生成した画像である。色覚が低域通過型を示すことを考えると、どの空間周波数成分まで解析すれば本実験における形状弁別課題を行うことができるのかについての手がかりを図9に示した図から得ることができるであろう。色弁別課題ではテスト領域の形状を知る必要がないため、 0.118 cpd の行を見れば分かるように、低空間周波数成分を解析するだけで十分課題を行うことができる。一方、形状弁別課題ではテスト領域形状の区別をする必

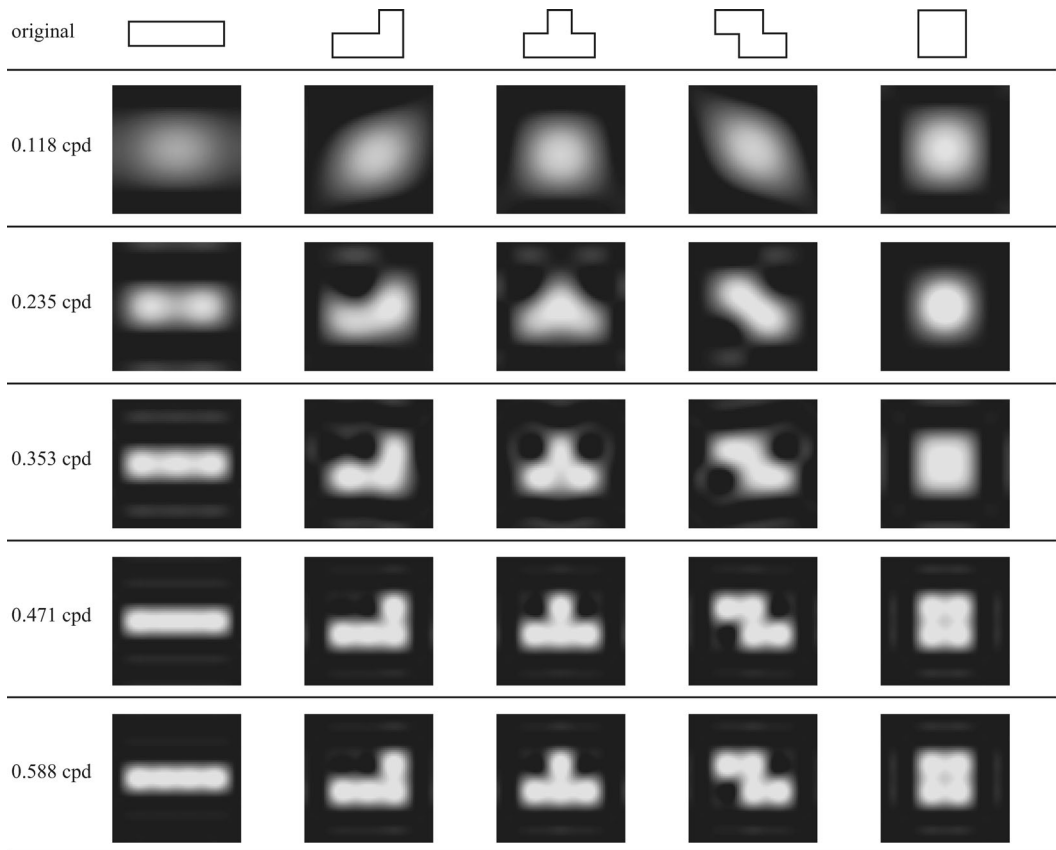


図9 形状弁別実験で用いたテトリス状の形状をフーリエ変換し、得られた空間周波数成分に最左列に示したカットオフ空間周波数を持つローパスフィルタをかけ、逆フーリエ変換して生成した画像。

要があるため、0.353 cpd 程度の空間周波数成分まで解析しないと形状弁別を行えないこと、またそれ以上の空間周波数成分を付加してもテスト領域の形状に対する情報はあまり得られないことが予想される。過去の多くの色覚の空間周波数特性に関する研究では、この空間周波数領域ではほとんど感度低下がみられず、また R-G メカニズムと Y-B メカニズムの間にも空間周波数特性の違いはみられない²¹⁾。したがって、空間周波数だけで形状弁別閾値と色弁別閾値の色相特性の違いを説明できるとは考えにくい。しかし、本研究のような細かい色相ごとにおける空間周波数特性に関してはこれまで報告されていない。この色相による空間周波数特性の違いについては今後検討する必要があるだろう。

色相による方向弁別特性の違いに関する報告は多くはないが、Beaudot and Mullen (2005)²²⁾ は高彩度刺激による方向弁別特性は R-G メカニズムと Y-B メカニズムの間にほとんど違いがないことを示した。この結果だけを考えれば、本研究における形状弁別課題と色弁別課題間の色相特性の違いは、局所的方向抽出の段階で起きているわけではないといえる。しかし、彼らの研究は本研究のような低コントラスト刺激の特性を調べておらず、また空間周波数特性同様、色相全体に渡って調べられている訳ではない。したがって、局所的方向抽出段階における色相特性を調べるためには、色相の違いにより定義した方向を持つ刺激を用いた方向弁別課題を細かい色相ごとに行う必要がある。

空間周波数や方向抽出における色相特性だけで形状弁別実験と色弁別実験の色相特性の違いが説明できないとすれば、その違いは色による方向情報の集約段階において表れる特性である可能性が高くなるだろう。もちろん、本実験だけではこの点について結論づけることはできない。

ここで、本実験から得られた形状弁別閾値と色弁別閾値の色相特性の違いを生じうる色覚メカニズムについて考える。前述したとおり、彩度分布が全色相範囲に同程度ノイズとして影響したことから、形状弁別課題と色弁別課題はど

ちらも様々な色相範囲に感度を持つマルチプルチャンネルの応答に基づいて行われたといえる。色弁別と形状弁別が同じマルチプルチャンネル群の応答のみに基づいているとすれば、チャンネルの各々が異なる空間周波数特性や方向抽出特性、あるいは方向情報集約特性を持つ場合に色相特性の違いを生じうる。また、色弁別と形状弁別に異なるマルチプルチャンネル群が関与しているのならば、各マルチプルチャンネル群のチャンネル数や色相選択性の違いなどが影響していることが考えられる。色ドットによる Glass パターン形状検出に関する研究^{12,13)}では、局所的方向抽出段階と方向情報集約段階では色相選択性のバンド幅が異なることから、各段階の処理は異なる生理学的機構において行われていることが示唆されている。しかし、本研究の結果からだけではこれらの色覚メカニズム特性に関する可能性を分離することはできない。より詳しく形状知覚と色弁別における色覚メカニズムの特性の違いを明らかにするためには、空間周波数や方向抽出の有無による色相特性の違いを調べることで、ノイズマスキングや順応などを用いて形状弁別と色弁別の色度特性の異なる違いを調べていくことなどが必要となるであろう。

6. おわりに

色による形状知覚における色度特性を調べるため、多色テクスチャ刺激を用いて色相の違いによる形状弁別課題と色弁別課題を行い、それらの閾値を比較した。形状知覚実験と色弁別実験のどちらにおいても、刺激に彩度分布を加えることにより全背景色角度の閾値が同程度高くなった。この結果は、両課題は cone-opponent チャンネルの応答に基づいて行われているわけではなく、また彩度と色相を分離処理している色覚メカニズムのみに基づいているわけではないことを示唆する。また、形状弁別閾値と色弁別閾値の間には全被験者で共通した色相特性の違いがみられた。形状知覚課題と色弁別課題の違いとして、必要な空間周波数特性や局所的方向抽出の必要性の有無、方向情報集約の必要性の

有無などが考えられ、課題間の色度特性の違いはこれらのいずれか（または複数）の処理において色相特性に変化が生じることを示唆している。

文 献

- 1) J. D. Mollon: "Tho' she kneed'd in that place where the grew..." The uses and origins of primate colour vision. *The Journal of Experimental Biology*, **146**, 21–38, 1989.
- 2) J. Krauskopf, D. R. Williams and D. W. Heeley: Cardinal directions of color space. *Vision Research*, **22**, 1123–1131, 1982.
- 3) M. J. Sankeralli and K. T. Mullen: Postreceptoral chromatic mechanisms revealed by noise masking in three-dimensional cone contrast space. *Journal of the Optical Society of America*, **14**, 2633–2646, 1997.
- 4) F. Giulianini and R. T. Eskew: Chromatic masking in the ($\Delta L/L$, $\Delta M/M$) plane of cone-contrast space reveals only two detection mechanisms. *Vision Research*, **38**, 3913–3926, 1998.
- 5) A. Li and P. Lennie: Mechanisms underlying segmentation of colored texture. *Vision Research*, **37**, 83–97.
- 6) M. J. Sankeralli and K. T. Mullen: Ratio model for suprathreshold hue-increment detection. *Journal of the Optical Society of America A*, **16**, 2625–2637.
- 7) J. Krauskopf and K. R. Gegenfurtner: Color discrimination and adaptation. *Vision Research*, **32**, 2165–2175, 1992.
- 8) N. Goda and M. Fujii: Sensitivity to modulation of color distribution in multi-colored textures. *Vision Research*, **41**, 2475–2485, 2001.
- 9) T. Hansen and K. R. Gegenfurtner: Higher level chromatic mechanisms for image segmentation. *Journal of Vision*, **6**, 239–259, 2006.
- 10) K. T. Mullen and W. H. A. Beaudot: Comparison of color and luminance vision on a global shape discrimination task. *Vision Research*, **42**, 565–575, 2002.
- 11) L. Glass: Moiré effect from random dots. *Nature*, **223**, 578–580, 1969.
- 12) K. S. Cardinal and D. C. Kiper: The detection of colored Glass patterns. *Journal of Vision*, **3**, 199–208, 2003.
- 13) M. F. Mandelli and D. C. Kiper: The local and global processing of chromatic Glass patterns. *Journal of Vision*, **5**, 405–416, 2005.
- 14) J. A. Wilson and E. Switkes: Integration of differing chromaticities in early and midlevel spatial vision. *Journal of the Optical Society of America A*, **22**, 2169–2181, 2005.
- 15) A. M. Derrington, J. Krauskopf, and P. Lennie: Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque. *The Journal of Physiology*, **357**, 241–265, 1984.
- 16) D. I. A. MacLeod and R. M. Boynton: Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance. *Journal of the Optical Society of America*, **69**, 1183–1186, 1979.
- 17) V. C. Smith and J. Pokorny: Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Research*, **15**, 161–171, 1975.
- 18) G. Wyszecki and W. S. Stiles: Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae. (2nd ed.). Wiley, 1982.
- 19) 丹後俊郎：統計モデル入門。朝倉書店，2004。
- 20) M. A. Webster, E. Miyahara, G. Malkocv and V. E. Raker: Variations in normal color vision. I. Cone-opponent axes. *Journal of the Optical Society of America A*, **17**, 1535–1544, 2000.
- 21) K. T. Mullen: The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings. *Journal of Physiology*, **359**, 381–400, 1985.
- 22) W. H. A. Beaudot and K. T. Mullen: Orientation selectivity in luminance and color vision assessed using 2-d band-pass filtered spatial noise. *Vision Research*, **45**, 687–696, 2005.