

視覚系における色情報表現と
そのタスク依存性に関する研究

(Color Information Representation in the Visual System and
Its Task Dependency)

2016 年 1 月

博士（工学）

佐藤 智治

豊橋技術科学大学

視覚系における色情報表現とそのタスク依存性に関する研究

論文要旨

ヒトの視覚系はあらゆる視覚情報をいくつかの特徴に分け、それらを統合するという処理を行っている。色情報は視覚系が処理する情報の一つであり、検出や形状抽出、同定など基礎的な役割を持っている。ヒトの色覚メカニズムに関する多くの研究によって、網膜上の波長感度特性が異なる3種類の錐体細胞の応答信号が、反対色表現へと変換されるといふ、視覚系における色情報処理の流れが明らかにされてきた。色情報はさらに変化し、視覚皮質において反対色以外の色相に選択的に応答するニューロンや、特定の色度に応答するニューロンが生理学的な研究によって発見されている。心理物理学的にもさまざまな実験刺激や被験者の知覚判断が研究され、反対色表現だけでは説明できない結果が得られている。心理物理学的なデータを基に反対色以降の色情報表現の色相の数や組み合わせといった詳細が推定されているが、その結果は研究グループ間で一致しない。従って、反対色以降の色情報表現が行動的にどのような役割をもっているかは未解明である。本論文では視覚系における色情報表現の変化を色相と彩度の観点から心理物理学的に論じたものである。

本論文ではまず、多色テクスチャにおける色知覚特性を説明するために必要な色相数を推定する手法を提案した。これまでの先行研究では主に色空間上で1次元分布するような刺激が使用されてきており、円分布のような2次元分布で定義された多色テクスチャはほとんど使用されていない。従って、多色ノイズによる色知覚への効果は十分に明らかにされているとはいえない。本論文では実験手法としてノイズ効果を詳細に調査可能なClassification Image (CI) 法を採用した。CI法によって得られた膨大なデータを色覚モデルの応答に変換し、被験者応答を再現するように色覚モデルのパラメータを推定した。モデル解析の結果、4つの色相、さらにいえば反対色表現の感度バランスを調整することで今回の実験結果を説明することができた。これは多色テクスチャを使用したいいくつかの先行研究と一致する。

次に、色弁別と閾上色差判断が刺激強度に対して同一の応答関数によって説明可能か検証した。色情報表現は照明光の色や周辺刺激の状況など、環境の変化に対応するために順応という機能を持っている。例えば、照明光の彩度が高い場合、視覚系は完全に順応することができず、順応領域が色づいてみえる。本論文ではこのような不完全色順応状態における色弁別と閾上色差を比較した。結果として、遂行するタスクによって感度が最適化されている「均衡点」が異なることがわかった。これは色弁別と閾上色差判断の間に異なる色情報表現が介在することを示唆する。

以上、本論文では色情報表現の変化を明らかにするべく、CI法と色覚モデルに基づく解析を組み合わせた新たな解析手法を提案した。また、心理物理学的タスクによって異なる色情報表現が介在することを示した。本論文の成果によって、色情報表現に関する先行研究が整理され、色情報表現の変化の様相が明らかになっていくものと考えられる。

Color Information Representation in the Visual System and Its Task Dependency

ABSTRACT

Human visual system divides incoming visual information into some features and integrates them. Color information is one of these visual information. Previous works have revealed that color information representation in the visual system varies as color information processing proceeds. In the initial stage, colors are encoded as the responses of three different classes of cone photoreceptors. Next, these cone signals are combined and transformed to the responses of one luminance channel and two opponent color channels in the second stage. Color representation at the second stage is referred to as cone-opponent. After the second stage, color representations of cortical neurons are more complex. Physiological studies find that the cortical neurons selectively respond to various hues in addition to the opponent colors. Psychophysical studies also reported a phenomenon that could not be explained by the cone-opponent representation, using various stimuli and psychophysical tasks. Although the properties of the post cone-opponent representation, such as the number of hues, peaks, and bandwidths of channels, have been estimated in several different studies, the results have been somewhat inconsistent. Therefore, it is still unclear what is a role of the post cone-opponent color representation. This thesis, therefore, aims to investigate the role of the transformation of color information representation in aspects of hue and saturation.

First, this thesis examined effects of heterochromatic noise on chromatic contrast perception. The Classification Image (CI) technique that enables us to investigate the effect of random chromatic noise on color perception was applied. The stimulus was a superposition image of two uniformly colored squares (signal images) and a multicolored texture (a noise image), whose colors were chosen out of an isoluminant plane in the Derrington-Krauskopf-Lennie (DKL) color space. The observers judged the relative chromatic contrasts of the two signal squares on the different noise textures. CI showed strong color modulations, whose color directions differed from the signal. Moreover, instead of a typical CI analysis procedure, the CI data were analyzed based on chromatic mechanism models to estimate the details of the mechanisms. The model was composed of several chromatic mechanisms tuned to different hues. Several chromatic mechanisms which effectively explained the combinations of the stimulus colors and an individual observer's responses were selected out of the candidates of the mechanisms with the stepwise procedure; the response weights of the selected mechanisms were adjusted with the logistic analysis so that

their responses fit the observers' responses. The analysis results showed that the model with only four mechanisms, including the cardinal models, was superior to the model composed of more mechanisms for explaining our results.

Next, this thesis discussed that a common response function could be responsible to perception of saturation in different psychophysical tasks: color discrimination and supra-threshold color difference (STCD) judgment. Both of color appearances and color discrimination performances are influenced by spatial context such as color of illumination or a color of uniform surround/pedestal. The adjustment of sensitivity accompanied by the changes in the context is referred as adaptation, and it enables us to maintain the color appearance or discrimination performance under various environments. However, incomplete chromatic adaptation has been reported in several studies on color appearance, where an adaptation color is too saturated to adapt it completely. In this case, color discrimination and STCD under the complete chromatic adaptation (Gray) and the incomplete chromatic adaptation condition (Red) were measured. The color-difference profiles were examined by evaluating the perceptual distances between various color pairs using the maximum likelihood difference scaling method. After that, sensitivity functions were derived from the responses of two tasks to test whether a common sensitivity function was responsible for both the tasks. In the Gray condition, the chromaticities corresponding to the smallest threshold and the largest color difference were almost identical. In contrast, in the Red condition, they were dissociated. The results obtained in the incomplete chromatic adaptation condition revealed the presence of at least two peaks. The primary peak location clearly differed between the two tasks, suggesting that different color representations or mechanisms were involved in the two tasks.

In summary, this thesis developed a novel method that combined the CI method with chromatic mechanisms models to estimate a detail of the color information representation in the visual system. This thesis also revealed distinct color information representations in the visual system which are responsible for color discrimination and STCD tasks. These findings allow us to organize the various aspects of the color information representation in the visual system which have been argued in the previous studies.

目次

第 1 章	序論	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	人間の脳における情報表現	1
1.1.2	色情報表現	2
1.2	本論文の目的	3
1.3	本論文の構成	4
第 2 章	色覚に関する先行研究	7
2.1	はじめに	7
2.2	光と色	7
2.3	表色	8
2.3.1	マンセル表色系	8
2.3.2	CIE 表色系	8
2.4	視覚神経系における色覚メカニズム	9
2.4.1	眼球、網膜構造	9
2.4.2	網膜における三色表現	10
2.4.3	三色表現から反対色表現への変換	10
2.4.4	外側膝状体での色情報表現	11
2.4.5	視覚野における色情報表現	12
2.5	順応	12
2.5.1	von Kries 型順応モデル	14
2.5.2	不完全色順応	14
2.5.3	共通応答関数モデル	14
2.6	生理学的色空間	15
2.6.1	Cone-contrast 空間	15
2.6.2	MacLeod-Boynton 色空間 (MB 色空間)	16
2.6.3	Derrington-Krauskopf-Lennie 色空間 (DKL 色空間)	17
2.7	心理尺度構成法	18

2.7.1	Fechner 式尺度化	19
2.7.2	Maximum likelihood difference scaling (MLDS) 法	19
2.8	色情報表現研究における心理物理学的手法	20
2.8.1	コントラスト順応	21
2.8.2	ペDESTAL 効果	21
2.8.3	ノイズマスキング	21
2.8.4	心理物理学逆相関法	24
2.9	本章の総括	25
第 3 章	色覚メカニズムモデルに基づく色コントラスト知覚特性の逆相関解析	27
3.1	はじめに	27
3.2	実験 1: CI 実験	28
3.2.1	実験装置	28
3.2.2	色空間	29
3.2.3	DKL 色空間正規化のための予備実験	29
3.2.4	呈示刺激	30
3.2.5	実験手続き	30
3.2.6	基礎解析	32
3.2.7	被験者	32
3.2.8	結果と考察	32
3.3	色覚メカニズムモデルに基づく CI 解析	36
3.3.1	色覚メカニズムモデル	37
3.3.2	マルチプルメカニズムモデルの解析	39
3.3.3	Cardinal モデルの解析	39
3.3.4	入力データ	40
3.3.5	最適化されたモデルの検証	40
3.3.6	シミュレーションの解析	40
3.3.7	結果と考察	41
3.4	考察	47
3.5	本章の総括	50
第 4 章	不完全色順応における色弁別と色の見えメカニズムの均衡点の分離	51
4.1	はじめに	51
4.2	手法	52
4.2.1	原理	52
4.2.2	装置	55
4.2.3	色空間	55
4.2.4	呈示刺激	55

4.2.5	実験手続き	56
4.2.6	被験者	56
4.2.7	予備実験: 無彩色点測定実験	57
4.3	実験 1: 色弁別	57
4.3.1	手法	57
4.3.2	結果と考察	59
4.4	実験 2: 閾上色差	60
4.4.1	手法	61
4.4.2	Single-peak モデルによる閾上色差特性の解析	62
4.4.3	Two-peak モデルによる閾上色差特性の解析	63
4.5	2つのタスク間の感度関数の比較	67
4.5.1	手法	67
4.5.2	結果と考察	68
4.6	考察	70
4.7	本章の総括	75
第 5 章	結論	77
5.1	総合考察	77
5.2	総括	79
	謝辞	89
	研究業績目録	91

第 1 章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 人間の脳における情報表現

人間は様々な感覚器官を用いて外界の情報を取得し、脳で処理をしながら生活している。認知科学の分野で脳の情報表現を議論する際に出てくるのが「おばあさん細胞仮説」である。これは自分のおばあさん (特定の人物) を認識するための単一細胞、あるいは少数の細胞群が存在するかどうかという問題である。「おばあさん」を認識するためには顔の輪郭や目や鼻、口などの多く特徴だけでなく、あらゆる角度から見たときの顔特徴も統合する必要がある。「おばあさん細胞仮説」は脳の処理において最終的な情報統合の一例であり、統合する情報が複数の異なる特徴になっている。同様な情報統合は低次な処理においても行われている。例えば、線分がどの方位に傾いているのか知覚するには、いくつかの特定の方位に選択的に応答する神経細胞が存在しており、その情報を統合することで線分の方位を知覚する。他にもコントラスト感度を決定する複数の空間周波数チャンネルが存在することが知られている。このように、人間の脳は外界の情報をいくつかの特徴に分類・統合している。本論文が扱う色情報も、脳の視覚系が処理する特徴の一つである。

色情報は最終的にはある範囲の色をまとめて 1 つのカテゴリとして名前が付けられている。この色の名前は発達した言語には 11 個の基本色名が存在することが明らかになっている。しかし、色情報が他の視覚情報処理と比べて特殊な点は、人間の網膜上において色と関係する波長情報は 3 次元に圧縮されてしまっている点である。従って、限られた色情報をもとに人間の脳は最終的には基本 11 色を作り出している。このような視覚系における色情報表現の処理過程を明らかにすることで、感覚器が符号化可能な限られた情報から脳がどのようにして有用な情報を抽出するか、その処理アルゴリズムを解明できる可能性がある。

1.1.2 色情報表現

まず、人間が色をどのように表現するか見ていくとそれは 3 つの性質に分類できる: 色味の数である「色相」、色の鮮やかさである「彩度」、そして色の暗さと明るさを表現する「明度」である。これらは色の三属性と呼ばれ、その組み合わせによってさまざまな色を表現できる。このように、色情報は 3 次元の値を使用して表現することができる。

次に、経験的な側面では全ての色を 3 種類の色の混色で再現できることに基づいた Young-Helmholtz の三色説が有名である。しかし、19 世紀に Hering は色の見えを注意深く観察した結果、赤と緑、青と黄といった色相は同時に経験できないことから色は 2 つの組、すなわち 4 色相で表現されるという反対色説を主張した。Hering はこの反対色関係となっている他の色では表現できない純粋な色をユニーク色相と定義している。三色説と反対色説は長い間互いに譲らずに議論されてきた。1950 年代に解剖学的・生理学的な手法の発展によって網膜上の錐体細胞のスペクトル感度特性の違いから 3 種類の錐体細胞が同定され、三色説は生理学的に実証された。この発見によって三色説と反対色説の議論は終わったかと思われた。しかし、ほぼ同時期に Svaetichin によって反対色応答を示すような応答がコイの網膜上の水平細胞から記録され、Hering の反対色説の生理学的な根拠がはじめて示された。このように、三色説と反対色説はそれぞれ心理物理学的、生理学的な証拠が発見されており、現在では二つの学説は「段階説」として統合されている。これは三色説と反対色説は両方とも正しいが、異なる視覚系の処理段階の色情報表現であるとする説である。

三色説や反対色説と相関がある神経活動が発見されたことによって視覚系における色情報表現の詳細が明らかになりつつあるが、Hering が提案したユニーク色相と生理学的に得られた反対色 (cone-opponent) は完全には一致せず、わずかに異なる色相になっている。これは反対色応答を示す細胞がそのまま色の見えを表現しているわけではないことを示唆する。従って、cone-opponent と Hering が提唱したような色の見えに基づく反対色の間にはさらなる色情報処理が存在すると考えられている。実際に、皮質に存在する色選択ニューロンは反対色以外のさまざまな色相に広く分布し、また、無彩色付近のような特定の彩度に選択的に応答することが知られている。従って、皮質における色情報は色相と彩度によって表現されていると考えられる。この生理学的に存在が明らかにされた cone-opponent 以降の色情報処理は高次色覚メカニズム (Higher-order color mechanism) と呼ばれており、その詳細は未解明である。

心理物理学的にも cone-opponent における色情報表現では説明できない現象が発見されてきている。1990 年代に順応による色の見えの変化 (コントラスト順応)、色ノイズによる閾値変化 (ノイズマスキング実験) において cone-opponent 以外の色相への選択的な感度変化が発見され、高次色覚メカニズムの存在が心理物理学的に示されている。これらの心理物理学的なデータを基に、結果の説明に必要な色相の数や組み合わせ、色相選択幅と

いった色情報表現の詳細が推定されてきているが一致した意見は未だにない。

1.2 本論文の目的

前述のように視覚系における色情報表現が三色から反対色に変化する段階までは、心理物理学的、生理学的にもよく理解されている。また、最終的な色見えである基本 11 色も明らかになっている。反対色と基本 11 色の中間に位置する高次色覚メカニズムについては、反対色以外の色相に選択的に応答するニューロンや特定の彩度に応答するニューロンが皮質に存在することが知られている。心理物理学的にも色見えや多色テクスチャ中の色弁別特性が高次色覚メカニズムに関係することが示唆されているが、その詳細については意見が一致しておらず、行動的な役割は未解明のままである。本論文では視覚系における色情報表現の変化について色相と彩度の観点から心理物理学的に検討する。

まず、ノイズマスキング実験では研究グループごとに異なるノイズが使用され、得られる結果も異なっている。その結果を説明するために反対色以外の色覚メカニズムが必要か、高次色覚メカニズムが必要ならばその特性が錐体応答の線形結合で推測できるかという点も議論されている。これらの異なる実験結果が、刺激パラメータやタスクによって異なる色情報表現を調査しているとすれば、推定される高次色覚メカニズムの詳細が異なることは十分考えられる。多くのノイズマスキング実験で使用されるノイズの色は、反対色関係の 2 色や特定の色相範囲に限られており、あらゆる色相を含んだ多色テクスチャにおける色知覚特性はほとんど調査されていない。色情報表現の変化によって色相選択性ニューロンの分布が変化するならば、色相の組み合わせによって色知覚に影響があると考えられる。そこで、本論文では様々な色相を含んだ多色テクスチャにおける色コントラスト知覚について心理物理学的逆相関法の一つである Classification Image 法と、モデル解析を組み合わせ多色テクスチャにおける色情報表現について調査する。

次に、色情報表現について心理物理学的には色相の数についてよく研究されているが、彩度の情報表現が同一かどうかはわからない。皮質には特定の彩度に選択的に応答するニューロンが存在しており、彩度情報に対してもなんらかの変換・補正が行われていると考えられる。心理物理学の基本原則として広く知られている Fechner の法則では、刺激の差を知覚できる変化量: 丁度可知差異 (just noticeable difference; jnd) を感覚量の単位とする。これは色覚の場合、色弁別の累積から色見えを推定できるということになる。Fechner の法則が色覚において成立するには弁別と見えが共通の刺激応答特性 (刺激に対して同じ応答特性を持つ神経回路) によって制御されている必要がある。本論文では、色情報表現において心理量がゼロというのは無彩色点に相当することに着目し、色情報表現の彩度について検証する。

本論文で検討する事項は次の通りである。

- 多色テクスチャにおける色コントラスト知覚はいくつの色相で表現されるか。そし

て、その色相の組み合わせは反対色かどうか。

- 色弁別と色の見えの間に色コントラストに対する応答特性は単一かどうか。

1.3 本論文の構成

図 1.1 に示すように、本論文は全 5 章で構成される。第 2 章では、視覚系における色情報表現について概説し、色情報表現に関する研究の問題点について述べる。第 3 章では多色テクスチャ中の色コントラスト知覚特性を説明するのに必要な色相数をモデル解析によって推定し、色相の観点から色情報表現を検討した。第 4 章では、彩度の観点から色情報表現を検討した。異なる心理物理実験タスク間の特性を比較し、それぞれのタスクで彩度表現が異なるか検討した。第 5 章で本論文を総括する。

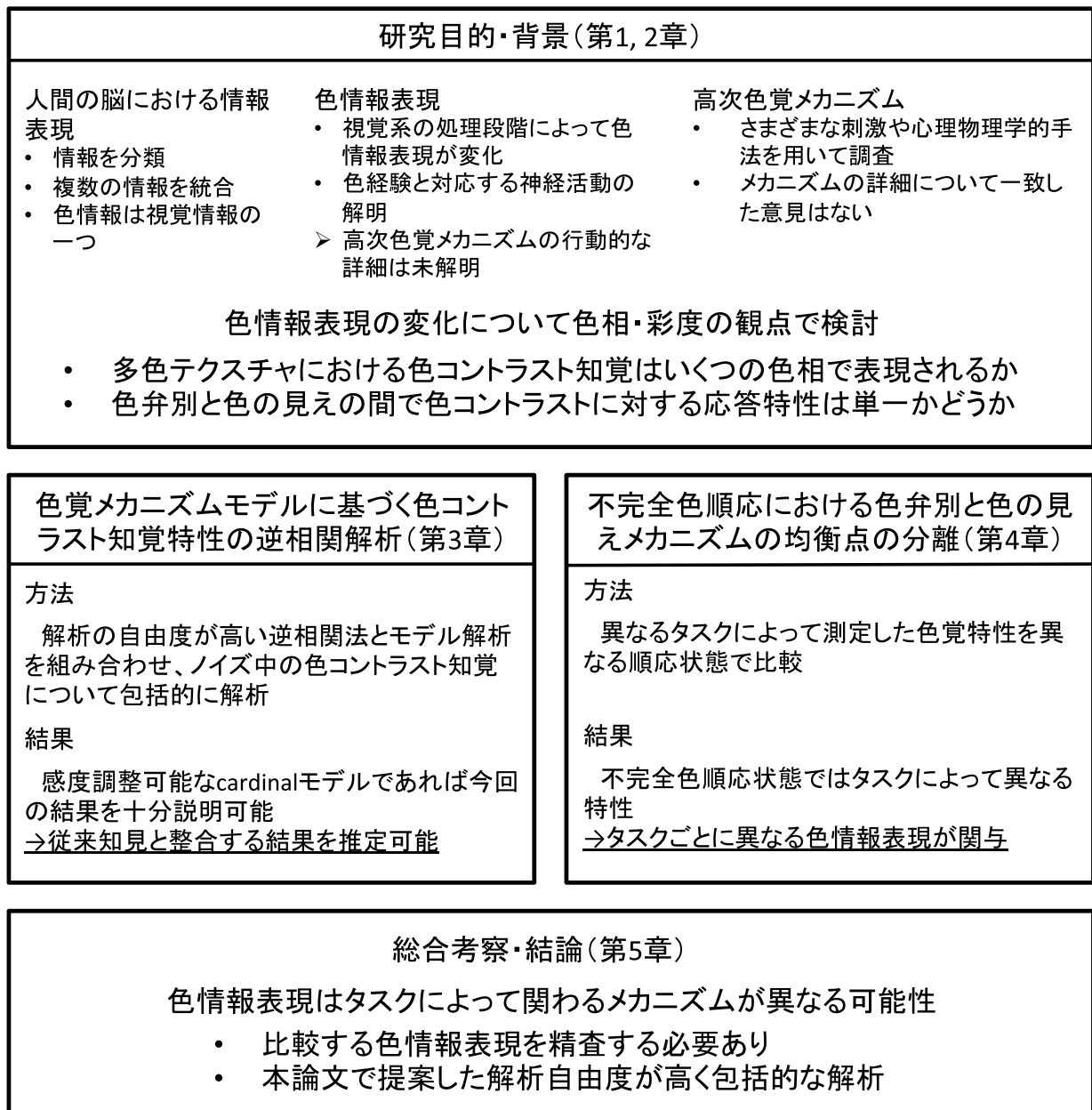


図 1.1 本論文の構成

第 2 章

色覚に関する先行研究

2.1 はじめに

本章では色に関する先行研究の成果によって構築された色を定量的に扱う方法、および視覚神経系において色情報がどのように処理されているのか心理物理学的、生理学的な知見を述べる。また、色情報表現において詳細が未解明な点を示し、問題点を指摘する。

2.2 光と色

視覚情報のもととなる光は電磁波の一種であり、さまざまな波長に分類される。色は視覚情報の一つであり、光の波長成分と関係している。ヒトの眼が符号化できる光の波長はおよそ 400nm から 700nm までであり、この範囲の光を特に可視光と呼ぶ。可視光の範囲は生物によって異なり、鳥類は紫外線も“見る”ことができる。Newton はプリズムを使って白色の太陽光を分光すると赤色から紫色へのグラデーションを観察した。また、Newton は分光された光をもう一度集光すると白色に戻ることも報告した。すなわち、白色はそれ以上分けることができないさまざまな色の光が混ざってできていることを実証した。

プリズムで分光した光からそれぞれ赤色のに見える単色光と緑色に見える単色光を混ぜると、その光の色の見えは単色光の黄色と類似する。赤と緑の混合で作った黄色の光をプリズムに通せば赤と緑に分光できる。しかし、白色光を分光して得た黄色の単色光はそれ以上分光できない。これは、見える色が同じであっても、分光分布が一意に定まらないことを示す。より身近な例では、蛍光灯と LED 照明はどちらも白色光ではあるが、その分光分布は異なる。このように、可視光の色の見え方は波長だけで決定されるわけではない。

色は私たちの視覚系が生み出す感覚であり、観察者の“見え”である。Newton が「光線に色はない。光線は色の感覚を起こさせる性質があるにすぎない」といったように、色は光の波長成分を基にして大脳系で生み出される神経応答である。

2.3 表色

色を定量的に扱う方法を表色といい、心理的な観点に立つ顕色系と、物理的な観点に立つ混色系が存在する。ここでは顕色系としてマンセル表色系、混色系として CIE 表色系について紹介する。

2.3.1 マンセル表色系

顕色系は心理的な印象に基づく主観的な色知覚を色票のような物体標準を用いて表現する。色票は色の属性に従って系統的に配列され、それぞれに記号と番号をつけ、これを用いて色を表現する。顕色系として代表的なものとしてはマンセル表色系がある。マンセル表色系は米国の画家 Munsell が 1905 年に考案し、その後 1930 年代末から米国光学会 (Optical Society of America; OSA) の測色委員会で尺度を修正した表色系である。

マンセル表色系では色票を円筒座標を用いて配列し、明度 V (マンセルバリュー) を縦軸に、色相 H (マンセルヒュー) を円周方向に、彩度 C (マンセルクロマ) を半径方向に配列している。これら 3 属性で色票を空間的に配列したものを色立体と呼ぶ。中心軸には白色・灰色・黒色のように色相を持たない色が配列されており、下から $V=0$ (理想的な黒) から $V=10$ (理想的な白) の順に配列してある。彩度の尺度は無彩色の彩度を $C=0$ として、中心軸からの距離で示している。色相は環状に配列してあり、これを色相環と呼ぶ。基本色相としては、赤色 (R)・黄色 (Y)・緑色 (G)・青色 (B)・紫色 (P) の 5 色を選び、色相環を 5 等分して配列してあり、次にこれらの中間の色相を設ける。さらに、基本色相と中間色相の間の色相を表現するために、基本色相と中間色相を中心に前後を 5 等分して、合計 100 色の色相が定められる。また、この表色系では各属性について知覚的に等間隔になるように各色票が選ばれている。

2.3.2 CIE 表色系

混色系では、任意の色が 3 原色の混合によって作り出せるという経験的な事実から、あらゆる色を 3 原色の混合比率によって表現する。これを加法混色といい、混色のもとになる色は原刺激と呼ばれる。任意の色 C を線形空間のベクトルとして表現するには、原刺激を R 、 G 、 B の 3 軸として次のように表される。

$$C = RR + GG + BB \quad (2.1)$$

ここで原刺激 R 、 G 、 B は単位ベクトルであり、任意の色 C は各軸の座標値 (R, G, B) で表現される。この (R, G, B) は 3 刺激値と呼ばれる。Grassmann は加法混色の現象をグラスマンの法則 (Grassmann's law) として次のようにまとめている。

$$\alpha C = \alpha R R + \alpha G G + \alpha B B \quad (2.2)$$

$$C_1 + C_2 = (R_1 + R_2)R + (G_1 + G_2)G + (B_1 + B_2)B \quad (2.3)$$

ここで表色において重要なのは次の 2 つである。

1. 3 刺激値を計算から求めることができるようにする。
2. 標準の原刺激を定め、共通の色空間で色を表現する。

1 つ目の問題は等色関数と呼ばれる等しいエネルギーの単色光に対する 3 刺激値を実験で求めておくことで解決できる。スペクトル光に対する 3 刺激値を波長 λ の関数で表した $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$ を等色関数と呼ぶ。

2 つ目の問題は原刺激を国際的に標準化すれば解決する。CIE (国際照明委員会; Commission internationale de l'éclairage) は 1931 年に原刺激 R 、 G 、 B をそれぞれ 700nm、546.1nm、435.8nm の単色光と定義して、CIE1931RGB 表色系を作った。

RGB 表色系の等色関数には負の値があり、計算をするとき不便なため、CIE は全ての色刺激が正の値で表現できるように原刺激として新たに XYZ を定めた。これらの原刺激による表色系を XYZ 表色系といい、XYZ は RGB 値の線形変換によって求められる。また、3 刺激値の総和で正規化した、

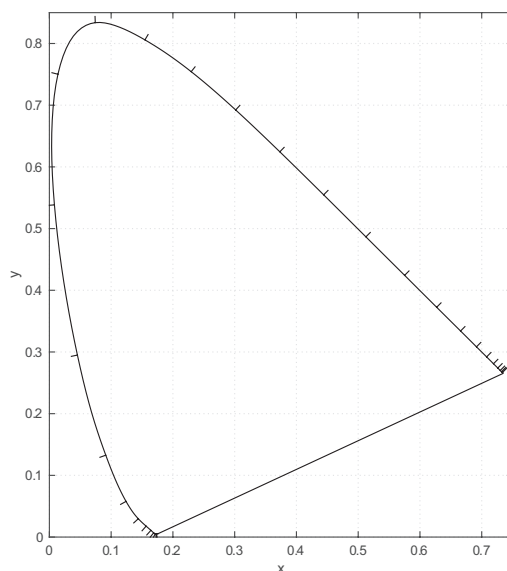
$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2.4)$$

は色度と呼ばれる。また、 x, y, z には $x + y + z = 1$ の関係があり、独立な変数は 2 個なので色度座標としてはこれらのうち 2 つを示せば十分である。図 2.1 に示した、 xy 色度値を示すための 2 次元平面を xy 色度図という。この色空間上での白色点のある色度点に定めれば、白色点から離れるほど色の鮮やかさ「彩度」が増す。一方、円周に沿って移動すると色味である「色相」が変化する。

2.4 視覚神経系における色覚メカニズム

2.4.1 眼球、網膜構造

視覚情報処理は眼球において外界からの光を取り込み、電気信号に変換することで始まる。眼球の構造はカメラと対応づけられ、水晶体はレンズ、虹彩は絞り、網膜はフィルム(あるいはイメージセンサ)に相当する。このなかでも、網膜は光を受容するための神経細胞(視細胞、水平細胞、双極細胞、アマクリン細胞、神経節細胞)が集中しており、網膜上での情報処理を行っている。外界からの光は網膜の一番奥にある光受容器である視細胞: 錐体 (cone) 細胞と桿体 (rod) 細胞で電気信号に変換される。錐体細胞は明るいところで機能し、桿体細胞は比較的暗いところで機能する。錐体・桿体細胞の電気信号は双極細胞を経て、神経節細胞においてインパルス応答の形に変換され、視神経を通して大脳へ送られ

図 2.1 xy 色度図

る。水平細胞は視細胞を横方向に結合し、また、異なる種類の錐体からの電気信号を統合し周辺受容野の形成に関与する。

2.4.2 網膜における三色表現

視覚系における色情報表現は主に錐体細胞の電気信号によって始まる。錐体細胞はスペクトル吸収のピークの違いによって 3 種類に分けられ、吸収波長が長い方から Long、Middle、Short の頭文字をとって L 錐体、M 錐体、S 錐体と呼ばれる。3 錐体の分光感度を表す関数は基本感度関数と呼ばれ、Smith & Pokorny[1] や Stockman & Shape[2] が測定したものが知られている。図 2.2 に Smith & Pokorny[1] の基本感度関数を示す。このように、色情報表現の始まりがスペクトル吸収ピークが異なる 3 種類の錐体細胞であるため、ヒトの色を表現するのに十分な色数は 3 種類となり、Young-Helmholtz の三色説を裏付ける生理学的な証拠となった。

2.4.3 三色表現から反対色表現への変換

錐体細胞の信号はその後、水平細胞へと送られる。Svaetichin[3] によってコイの網膜の水平細胞からスペクトル波長に応じて正・負両方の極性を示す応答が記録されたことで、水平細胞においてすでに三色表現から反対色表現に変換されていることが明らかになった。このような水平細胞の応答は Svaetichin の S を取って S ポテンシャルと呼ばれている。この水平細胞における反対色応答の発見は、Hering が提唱した反対色説の生理学的な証拠となった。ただし、マカクザルの水平細胞は解剖学的に錐体細胞への選択的な接続

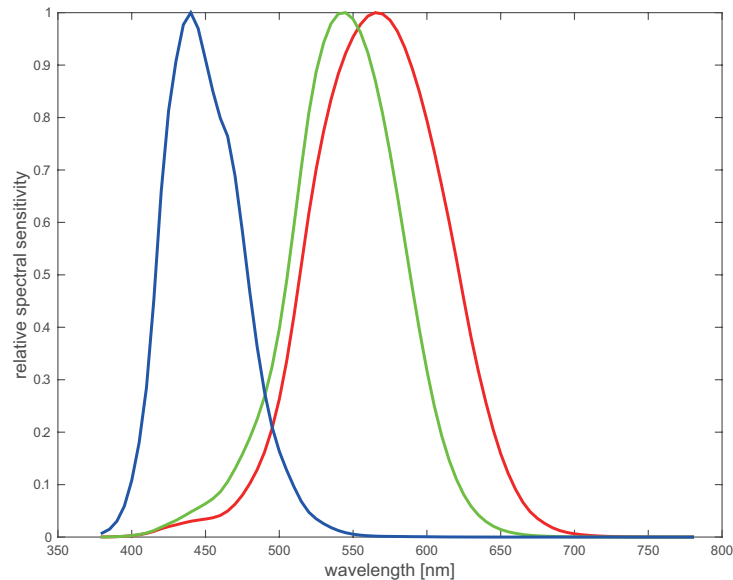


図 2.2 Smith & Pokorny[1] による基本感度関数

各錐体の分光感度の最大値が 1 になるように正規化してある。

がなく [4]、反対色応答を示さないと考えられている。マカクザルの場合、網膜においてさらに信号伝達が進んだ網膜神経節細胞 (retinal ganglion cell; RGC) から反対色応答が記録されている [5]。

2.4.4 外側膝状体での色情報表現

神経節細胞からの応答は視神経を通り、外側膝状体 (lateral geniculate nucleus; LGN) を経て大脳皮質の視覚野へと送られる。外側膝状体は 6 層構造を持ち、各層は左右片方の眼の情報を受け取る。腹側の 1、2 層の細胞は大細胞層 (magnocellular layer) と呼ばれ、運動視や空間視に必要な情報を運ぶと考えられている。一方、背側の 3 から 6 層は小細胞層 (parvocellular layer) と呼ばれ、形態視や色覚に必要な情報を運ぶ。LGN の 6 層の間にも特殊な免疫染色性をもつ細胞集団が存在し、微小細胞層 (koniocellular layer) と呼ばれる層を構成している。この層は眼球運動との関連や、V1 ニューロンの活動性の調節などの役割が示唆されているが不明な点が多い [6]。LGN ニューロンの空間特性と色特性は RGC の特性を引き継いでいる。マカクザルの LGN ニューロンの色特性は De Valois[7] によりはじめてスペクトル応答が測定され、LGN の小細胞層において反対色応答が存在することが示された。

2.4.5 視覚野における色情報表現

LGN からの情報は脳皮質一次視覚野 (V1) へ伝達される。LGN において大細胞層と小細胞層に分離されていた情報はここでも分離されており、大細胞層の情報は V1 の $4C\alpha$ 層、小細胞層の情報は $4C\beta$ 層へとつながっている。V1 では両眼反応性や方位選択性を持つニューロンが存在し、この点が LGN と大きく異なる。色情報は 2、3 層のプロブと呼ばれる部位を通り、さらに V2 野の細い縞領域 (thin-stripe region) を経由して V4 野へと送られる。

V1 ニューロンの色選択性は LGN ニューロンのように反対色に集中する傾向があるが、その色相選択性は広く分布する [8]。V1 以降の視覚野でもこの傾向は見られ、V2[9]、V3[10] においても色選択ニューロンの色相選択性は広く分布し、cardinal 軸やユニーク色相に集中するような傾向は見られない。

V4 野には色の見えに選択的に応答する細胞が存在し、皮質における色情報処理の重要な部位であると考えられている。例えば、図 2.3 に示したようなモンドリアンパターンを白色光と緑色の照明下で観察した場合を考える。V1 の緑色に選択的に応答する細胞は、白色照明下では緑色パッチに対して応答し、白色パッチには応答しない。しかし、緑色の照明下では白色パッチの分光分布が緑色照明と一致するため、緑色パッチと白色パッチの両方に応答する。一方、V4 の緑色に選択的に応答する細胞は、照明環境が変化しても緑色パッチにだけ応答し、緑照明下の白色パッチには応答しない。このように環境が変化しても色の見えが安定する現象を色恒常性といい、V4 は色恒常性に重要な役割を担っていると考えられている。

また、下側頭皮質 (inferior temporal cortex; IT) から特定の色相と彩度を選択的に応答するニューロンが発見されており [11, 12]、皮質において色は色相と彩度で表現されていると考えられる。さらに、IT 細胞の応答パターンと人間のカテゴリカル色知覚パターン [13] が類似することから、カテゴリカル色知覚は IT 細胞の応答と結びつけられる可能性が指摘されている [14]。

こうした皮質の色選択性は主にマカクザルを用いた電気生理実験によって記録されている。最近になって機能的磁気共鳴画像 (functional magnetic resonance imaging; fMRI) を用いた研究によって、ヒトの視覚野においても反対色以外の色相に選択的に応答するニューロンが発見されている [15]。

2.5 順応

暗いトンネルの中から外へと出たとき、初めは眩しかったのにしばらくすると眩しさは消え、周囲の環境がよくみえるようになる。これは人間の視覚系が周囲の環境変化に合わせて感度を調節しているためである。先に挙げた例は光刺激の強度レベルに対する感度調

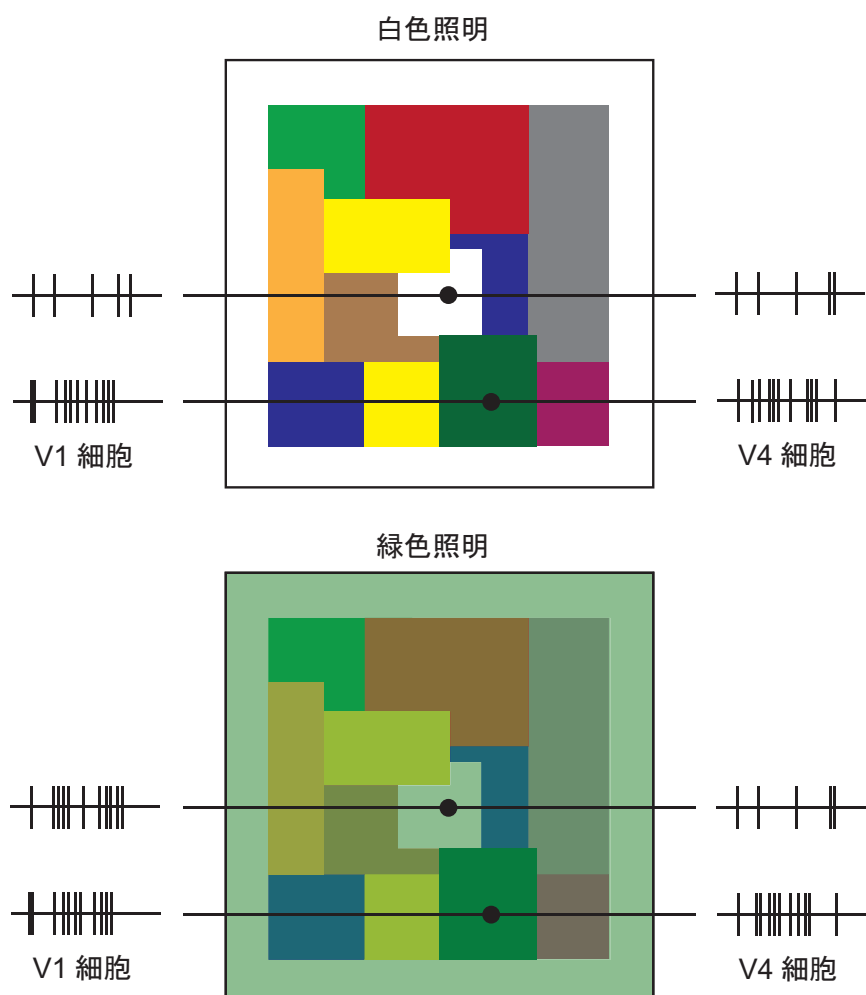


図 2.3 V1 と V4 における色選択性ニューロンの照明光の影響 ([16] を参考に作図)

節であり明暗順応と呼ばれる。順応は色情報に対しても生じ、色順応と呼ばれる。その感度変化は照明変化に対して物体の色があまり変化しないように調整され、3 から 5 分でほぼ平衡状態に達する。例えば、赤い刺激をずっと観察していると、その彩度は減少していき最終的には無彩色となる。そして、赤い刺激に十分な時間順応したあと、呈示されていた領域に順応前に無彩色に見えていた刺激を呈示すると赤の反対色である緑色にみえる。これは残像と呼ばれ、赤に応答するメカニズムの感度が抑制されたため、相対的に無彩色に対する緑応答が強くなったため生じる。このように順応した色 (順応色) が無彩色となり、これを基準に色相や彩度の値が決められる。

2.5.1 von Kries 型順応モデル

もっとも基本的な色順応モデルは von Kries 型順応モデルである [17]。von Kries 型順応モデルは次式で表される。

$$L' = k_L L \quad (2.5)$$

$$M' = k_M M \quad (2.6)$$

$$S' = k_S S \quad (2.7)$$

ここで、 L 、 M 、 S は順応前、 L' 、 M' 、 S' は順応後の 3 錐体の応答を示す。このモデルは 3 種類の錐体それぞれに係数 k_L 、 k_M 、 k_S があり、この係数によって各錐体応答が制御される。この係数はゲインとも呼ばれる。von Kries 型順応モデルにおいて係数は順応色に対する各錐体応答の逆数と比例するようになっており、結果として順応色において 3 錐体の応答が均衡する。

2.5.2 不完全色順応

色の見えを調査した先行研究で、順応色が高彩度な場合に不完全色順応が生じることが報告されている [18, 19, 20, 21, 22]。不完全色順応状態では被験者の無彩色点は順応領域の色度と異なり、照明の色度が残ってしまう。無彩色点の軌跡は呈示刺激の輝度に伴って補正量が変化し、輝度が高いほど完全色順応に近づくことが明らかになっている [22]。これは、有彩色照明下において「無彩色反射物体の見た目の色が明度によって異なる」現象 (Helson-Judd 効果)[23] と類似する。これらの研究結果から色の見えの推定には明度の影響も考慮する必要がある。von Kries モデルを拡張した先行研究はゲインの制御に非線形な処理を加える事で不完全色順応を説明している [18, 19]。不完全色順応を考慮して色の見えに対する補正方法が存在するが、実験条件によって順応の程度が異なる。そのため、色の見えモデルとして国際的な標準化はされていない [23]。

Fechner の法則 [24] を考えると、色の見えの基準点である無彩色点が順応色と異なれば、弁別閾値が最小となる色度も順応色と異なると予想される。しかし、色空間上のあらゆる色度に順応しても、弁別閾値が最小となる色度は順応色と一致することが報告されている [25]。他の先行研究でも色弁別と順応色度の関係について同様な傾向を報告しており [26, 27, 28]、色弁別は不完全色順応に相当する現象が見られず、常に完全色順応しているような特性が見られる。

2.5.3 共通応答関数モデル

Hillis & Brainard[29] は色の見えと色弁別の関係をモデル化し、2 つのタスクが色情報表現を共有しているかどうか調査した。Hillis & Brainard が提案したモデルを図 2.4 に示す。図 2.4 の横軸は刺激強度 I (色コントラスト)、縦軸は心理応答量 R (色の見え) となってお

り、2つの異なる順応状態の関数 ($F1$ と $F2$) がプロットされている。彼らは応答関数を次のように定義した。

$$R = M \frac{(gI + s)^p}{(gI + s)^q + 1} \quad (2.8)$$

ここで M は関数の最大出力を制御し、 p と q は刺激強度が低い場合と高い場合の関数の形状を決定する。 g はゲインパラメータ、 s は減算項である。順応によってこれらのパラメータ (主に g と s) が変化することで応答関数の形状が変化する。

図 2.4(a) は 2 つの関数の色の見えが一致する色コントラストを導出する過程を示している。縦軸の値 R に対応する刺激強度が $F1$ 、 $F2$ ごとに I_1 と I_2 が計算でき、これは異なる順応状態での色の見えが一致する色コントラストがそれぞれ I_1 と I_2 であることを示す。また、図 2.4(b) に示すように応答関数から弁別閾値を推定できる。縦軸の 2 点間の差分 ΔR を弁別可能な差に設定すれば、対応する色コントラストの差分が弁別閾値 jnd_1 と jnd_2 となる。ここでは応答量から刺激強度の推定を行ったが、関数の形状が分かっているならば弁別閾値から心理応答量の導出もできる。このように色の見えと弁別が共通の応答関数ならば、色の見えから弁別を、弁別から色の見えを相互に推定することが可能となる。Hillis & Brainard[29, 30] はこの共通応答関数モデルを用いて、弁別と色の見えの順応によるパフォーマンス変化が、共通の応答関数で説明できることを報告した。

しかしながら、いくつかの先行研究において弁別と色の見えの間に異なる順応メカニズムが存在することが示唆されている [31, 32]。また、2.5.2 節で述べたとおり、色の見えは順応色によって不完全色順応が生じるのに対して、色弁別はあらゆる順応色で感度最大になり、不完全色順応が生じない。このように、不完全順応状態では色の見えと色弁別特性が異なることが予想される。しかし、不完全色順応における色弁別と色の見えを直接比較した研究はほとんどなく、不完全色順応状態でも色弁別と色の見えが同一メカニズムによって説明可能かどうかは明らかではない。

2.6 生理学的色空間

2.3.2 節で述べた CIE 表色系は色を工学的に表現するのに有用である。しかし、前述した生理学的な色情報表現にを扱うには生理学的な特性に基づいた色空間を使用するのが適切だと考えられる。ここでは生理学的な知見に基づいて定義された色空間について紹介する。

2.6.1 Cone-contrast 空間

Cone-contrast 色空間 [33] は順応色と任意の色の各錐体応答差分で色を表現する。順応刺激と任意の色刺激に対する錐体応答をそれぞれ (L_0, M_0, S_0) 、 $(L_{test}, M_{test}, S_{test})$ とし、その差分を

$$(\Delta L, \Delta M, \Delta S) = (L_{test}, M_{test}, S_{test}) - (L_0, M_0, S_0) \quad (2.9)$$

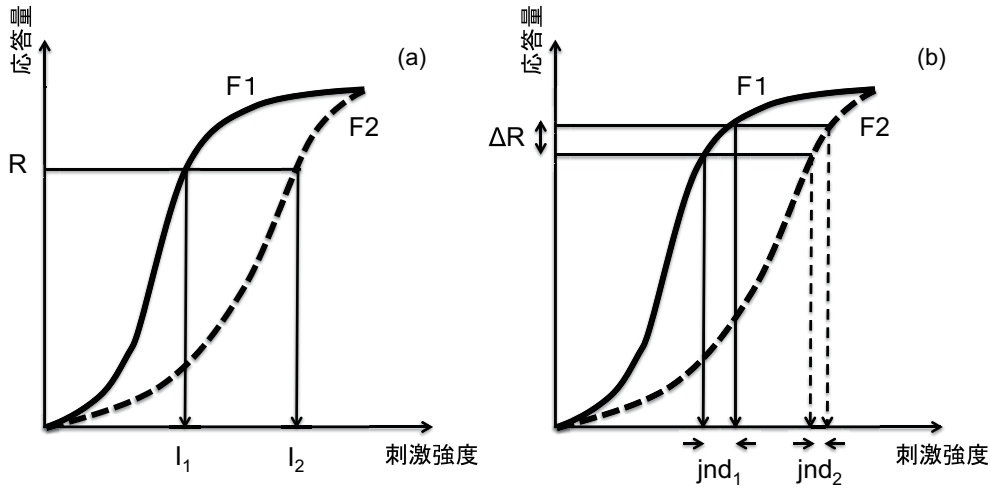


図 2.4 共通応答関数モデル (Hillis & Brainard (2005)[29] を参考に作図)

横軸は刺激強度 (色コントラスト) を、縦軸は刺激に対する応答量 (色の見え) をそれぞれ示す。異なる順応状態の応答関数 F1 と F2 が実線と破線でそれぞれ示されている。(a) 異なる順応状態で色の見えが等しくなるコントラストの推定、(b) 異なる順応状態での弁別閾値の推定

とすれば、Cone-contrast 空間は

$$\left(\frac{\Delta L}{L_0}, \frac{\Delta M}{M_0}, \frac{\Delta S}{S_0} \right) \quad (2.10)$$

で任意の色を表現する。これは錐体特有の神経経路における von Kries 型順応に類似している。

2.6.2 MacLeod-Boynton 色空間 (MB 色空間)

MacLeod-Boynton (MB) 色空間 [34] は 1 つの輝度軸と 2 つの色軸で構成される。色軸の一つは等輝度を維持しながら L 錐体と M 錐体が差動的に変化し S 錐体の応答が一定な軸で r 軸と呼ばれる。もう一つの色軸は S 錐体の応答が選択的に変化する軸であり、 b 軸と呼ばれる。輝度軸は L 錐体と M 錐体の重み付け和で表現され、S 錐体は輝度に寄与しないと仮定している。錐体応答を L 、 M 、 S とすれば、MB 色空間の各軸 (Lum , r , b) は次式で表される。

$$Lum = L + M \quad (2.11)$$

$$r = \frac{L}{L + M} \quad (2.12)$$

$$b = \frac{S}{L + M} \quad (2.13)$$

MB 色空間は反対色応答を表現しており、 r は赤・緑の変化、 b は青・黄方向の変化に概ね相当する。

2.6.3 Derrington-Krauskopf-Lennie 色空間 (DKL 色空間)

図 2.5 に DKL 色空間 [35] を示す。DKL 色空間は錐体分光感度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、原点の順応色で交差する輝度、L-M、S-(L+M) の 3 軸から構成される。これら 3 軸は cardinal 軸と呼ばれる。L-M 軸の正負方向はそれぞれ赤-緑、S-(L+M) 軸の正負方向は青-黄に対応する。ただし、厳密に言えばこれらの軸の色の見えは赤、緑、青、黄ではなく、L-M 軸正方向はピンク、S 軸正方向は紫がかって見える。錐体応答を L 、 M 、 S 、順応点を (L_0, M_0, S_0) とすれば、DKL 色空間 $(Lum, L - M, S - (L + M))$ は次のように表される。

$$\begin{pmatrix} \frac{Lum}{k_{Lum}} \\ \frac{L - M}{k_{L-M}} \\ \frac{S - (L + M)}{k_{S-(L+M)}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{L_0}{M_0} & 0 \\ -1 & 1 & \frac{L_0 + M_0}{S_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta L \\ \Delta M \\ \Delta S \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

ただし、

$$\begin{pmatrix} \Delta L \\ \Delta M \\ \Delta S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L - L_0 \\ M - M_0 \\ S - S_0 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

である。また、DKL 色空間は極座標でも表現されることがあり、その場合は刺激コントラスト r 、仰角 (輝度軸の変化に相当) θ 、色角度 ϕ となる。

DKL 色空間の各軸の正規化手法は決定的なものがなく実験の目的によって使い分けられている。正規化手法には、呈示装置が表示できる最大コントラストや被験者の各 cardinal 軸における色弁別閾値、cone-contrast 空間における変化量と一致させる (DKL 色空間の各軸が 1 だけ変化したとき、pooled cone contrast も 1 だけ変化する) といった方法がある [33]。pooled cone contrast で DKL 色空間を正規化する場合の正規化係数は、

$$k_{Lum} = \frac{\sqrt{3}}{L_0 + M_0} \quad (2.16)$$

$$k_{L-M} = \frac{\sqrt{L_0^2 + M_0^2}}{L_0(L_0 + M_0)} \quad (2.17)$$

$$k_{S-(L+M)} = \frac{1}{L_0 + M_0} \quad (2.18)$$

となる。

Krauskopf et al.[36] はこの色空間上の各軸方向に時間的に変化する色刺激に順応した場合の検出閾値の変化を測定し、cardinal 軸に選択的な閾値変化が生じることを明らかにし

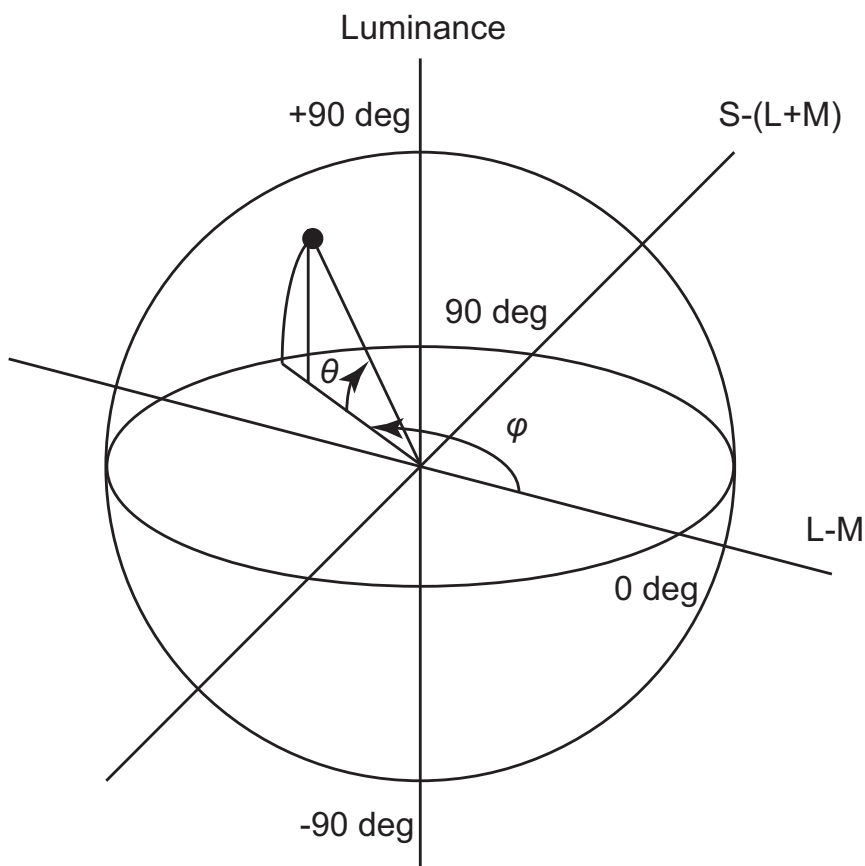


図 2.5 DKL 色空間

た。また、順応刺激の軸と検出刺激の軸が直交する場合、閾値変化がほとんど生じないことも明らかにした。これらの結果は cardinal 軸に沿った色検出メカニズムの存在を示唆する。また、生理学的には、Derrington et al.[35] がこの色空間の軸に沿って刺激の色、明るさを変化させたときの LGN ニューロンの色特性を調べており、cardinal 軸に色選択性ニューロンが集中することが明らかになっている。これらの研究結果から、DKL 色空間の各軸が視覚系における色情報表現において機能的に独立したメカニズムであることが心理物理学的・生理学的に明らかになっている。

2.7 心理尺度構成法

心理物理学の目的の一つは物理量と心理量の量的な関係を明らかにする事である [37]。ここでは心理物理実験より得られた被験者応答とその応答を引き起こした物理量を接続し、心理量の計量尺度を作成する心理尺度構成法について、Fechner 式尺度化法と MLDS 法について紹介する。

2.7.1 Fechner 式尺度化

あるテスト刺激と基準刺激の違いがちょうど知覚できるようになる物理量は丁度可知差異あるいは弁別閾と呼ばれる。弁別閾は一定の値ではなく、基準刺激の物理量に比例することが知られている。基準刺激の物理量を I 、弁別閾を ΔI とすれば次のように一定の比率 k になる。

$$k = \frac{\Delta I}{I} \quad (2.19)$$

これは Weber の法則 [24] として知られている。

Weber の法則は感覚量における尺度は弁別閾から導出できることを示唆する。Fechner は Weber の法則をもとに、刺激の弁別閾値を感覚量の単位とすることを提案した。従って、弁別閾値を累積すれば感覚量の尺度値を推定できることになる。弁別閾値が Weber の法則に従う場合、感覚量 S は次のように表される。

$$S = k \log I + \alpha \quad (2.20)$$

これは Fechner の法則 [24] と呼ばれる。式 2.20 において α は積分定数であり、任意原点における感覚量に相当する。

Fechner 式尺度化法 [37] の重要な点は弁別閾を感覚量として扱う点であり、弁別閾値と刺激量の関係が Weber の法則に従う事が前提ではない。そのため、Weber の法則以外の法則を仮定した場合、感覚量 S は式 2.20 のような対数則にはならない。

2.7.2 Maximum likelihood difference scaling (MLDS) 法

Maximum likelihood difference scaling (MLDS) 法 [38] は実験において、ある刺激対を 2 組呈示し、例えば被験者に差が大きい方を選択してもらう。このとき被験者の判断は呈示された刺激対の差に対して確率的に変化する。この反応のばらつき具合を利用して心理的尺度を構成する手法である。MLDS 法の利点は刺激間の差が閾値を超えている場合 (閾上) の心理量の差を推定できることである。

具体例を挙げて説明すると、今、緑から灰色、そして赤の軸上から色度を等間隔に変化させた色パッチが 11 枚あり、それぞれ 1 から 11 までの番号が振ってあるとする。この中から (2, 5) と (8, 7) が被験者に呈示され、どちらの刺激対の方が差が大きい判断する。MLDS 法の目的はこれらのパッチごとに被験者の判断に当てはまる心理量を与えることである。MLDS 法は閾上色差の他にも屈折率による透明感変化 [39] や水彩効果の強度推定 [40] に対して適用されている。

総数 N の刺激 S_1, S_2, \dots, S_N が実験刺激と選択され、この刺激は物理量として $\phi_1 < \phi_2 < \dots < \phi_N$ のように単調増加とする。被験者には (S_i, S_j) と (S_k, S_l) が呈示され、どちらの差分がより大きい判断する。これは被験者が (S_i, S_j) を選択した場合、各刺激

S_1, S_2, \dots, S_N に対する知覚量を $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N$ とすれば、 $|\psi_i - \psi_j| > |\psi_k - \psi_l|$ とかける。もし刺激対間の差分が0の場合、被験者の応答は不安定になるはずである。従って、被験者判断が確率的に変化するようなモデルを構築する。ここでは、ノイズを含んだ判断変数を D とし、被験者応答が (S_i, S_j) を選択する場合を次のように仮定する。

$$D(i, j; k, l) = (\psi_i - \psi_j) - (\psi_k - \psi_l) + \epsilon > 0 \quad (2.21)$$

ここで ϵ は平均が0、分散が $\sigma(>0)$ のガウス確率変数である。 $D(i, j; k, l)$ が正に大きいほど被験者が (S_i, S_j) を選択する確率も大きくなる。

被験者が (S_i, S_j) を選択する確率は、 $P[D(i, j, k, l)] > 0 | \psi_1, \dots, \psi_N, \sigma]$ であり、累積ガウス分布 $\Phi_\sigma((\psi_i - \psi_j) - (\psi_k - \psi_l))$ によって計算できる。また (S_k, S_l) が選ばれる確率は $1 - \Phi_\sigma((\psi_i - \psi_j) - (\psi_k - \psi_l))$ である。実験ではさまざまな組み合わせに対して被験者は判断を行う。全部で T 試行ある試行のうち t 番目の刺激の組み合わせを $\Delta_t = (\psi_{i,t} - \psi_{j,t}) - (\psi_{k,t} - \psi_{l,t})$ とし、そのときの被験者応答を R_t (1: 刺激対 (S_i, S_j) を選択、0: (S_i, S_j) を選択せず) とすれば、尤度は次式で表される。

$$L(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N, \sigma | R_1, R_2, \dots, R_T) = \prod_{t=1}^T \Phi(\Delta_t)^{R_t} (1 - \Phi(\Delta_t))^{(1-R_t)} \quad (2.22)$$

この尤度を最大化する推定解 $\hat{\psi}_1, \hat{\psi}_2, \dots, \hat{\psi}_N$ と $\hat{\sigma}$ を推定すれば、被験者応答を再現する刺激の心理量が推定できる。フリーパラメータが $N+1$ 個あるが、 $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N$ を σ で線形変換すれば、もとのパラメータに等しい推定を得る事ができる。従って、 $\psi_1 = 0, \psi_N = 1$ とすることができ、フリーパラメータは $N-1$ 個となる。

2.8 色情報表現研究における心理物理学的手法

視覚系において色情報表現が変化することは生理学的な知見から明らかである。心理物理実験においても色情報表現を明らかにするべく、さまざまな実験が実施されてきた。多くの実験の論理は次の通りである: 何らかの効果(マスキングや順応)は二つの刺激の色度の関数として研究される。一つはテスト刺激で、もう一つは補助刺激(ノイズなど)である。テスト刺激がある色相に設定され、補助刺激の色相が変化する。ほとんどの実験は刺激を色空間上の一つの平面上に制限する。そして、結果について注目する点は次の3つである[41]。

1. 補助刺激の効果が最大になる位置はテスト刺激の位置と一致するか、あるいは他の位置にあるか。
2. マスクパターンの形状やバンド幅はどのようになっているか。
3. どの色相で補助刺激の影響がゼロになるか、それはテスト刺激から 90° 離れているか。

ここではこれまでの色覚研究で利用されてきた、コントラスト順応やノイズマスキング、ペDESTAL効果、心理物理学の逆相関法について紹介する。

2.8.1 コントラスト順応

コントラスト順応実験では補助刺激は色度が色空間上のある軸方向に沿って時間的に変化する順応刺激である。順応後、テスト刺激の弁別閾値や色の見えの変化を測定する。例えば、Webster & Mollon[42] は、被験者がある色方向に順応した後の、様々なテスト色に対する色の見えを測定した。彼らの結果は、cardinal 軸と non-cardinal 軸の両方とも、特にテスト色の色方向と順応色方向が同じときに、テスト色の知覚される彩度が減少することを示した。また順応色方向と直交するテスト色への効果は比較的小さかった。これらの結果は cardinal 軸だけではなく、non-cardinal 軸に応答するメカニズムが存在することを示唆する。他の色順応効果を利用した研究においても選択的なコントラスト感度の低下が報告されている [43, 44]。

2.8.2 ペDESTAL効果

ペDESTALとは補助刺激であり、一定のコントラストをテスト刺激に与える刺激である。この一定のコントラストがテスト刺激の弁別に与える影響をペDESTAL効果という。ペDESTALとテスト刺激が同一メカニズムによって検出される場合、ペDESTALが低コントラストな場合は検出を助け弁別閾値が小さくなる。一方、ペDESTALが高コントラストな場合は検出を阻害し弁別閾値が大きくなる。例えば、Krauskopf & Gegenfurtner[25] はさまざまな順応色におけるペDESTAL効果を測定し、色弁別閾値は順応した色度で最小になる事を示した。さらに、色弁別閾値とペDESTALの間には正の比例関係があった。Sankeralli & Mullen[45] も均一色刺激をペDESTALとして色弁別閾値を測定した。その結果、弁別閾値はペDESTALと順応色を結んだ線にそって上昇し、直交する色相への影響は小さかった。このように、ペDESTAL効果によって cardinal 軸以外の軸へ選択的に応答するメカニズムの存在が示唆されている。さらに言えば、これらの結果は弁別閾値を超えた色 (閾上) に感度をもった弁別メカニズムが存在することを示唆する。

2.8.3 ノイズマスキング

ノイズマスキング実験はコントラスト順応と同様に色情報表現を明らかにするために広く利用されている [46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58]。ノイズマスキングでは補助刺激は特定の色軸に沿って色度が分布するノイズテクスチャ、あるいは時間的に色度に変化する刺激である。具体的にテスト刺激がノイズテクスチャ中に埋め込まれた場合を考える。テスト刺激とノイズテクスチャが同一メカニズムで情報処理された場合、メカニズムの SN 比が悪化するためテスト刺激を検出するにはより大きな信号を必要とする。

対照的に、テスト刺激とノイズテクスチャが別のメカニズムによって情報処理されるならば、SN 比の悪化は生じず、検出可能なテスト刺激の強度はノイズがない状態とほとんど変わらないだろう。このように、テスト刺激に対するノイズの影響を調査し、色覚メカニズムを明らかにするのがノイズマスキングである。

表 2.1 に示すように、ノイズマスキングは実験に使用する色空間やノイズのパラメータによって異なる結果が得られている。まず、cardinal 軸に選択的な閾値変化が見られないのは Cone-contrast 空間で刺激を定義した場合であることがわかる。これは Cone-contrast 空間で定義されたノイズが信号検出メカニズムを効果的にマスクできていないことが原因だと指摘されている [59]。次に、cardinal 軸以外の存在を示唆した結果でも、錐体応答の線形結合メカニズムか非線形結合メカニズムかという点で意見が分かれている。

例えば、Gegenfurtner & Kiper[46] は、輝度-L-M 平面上で色度が定義された動的 2 次元ランダムノイズから、輝度軸方向あるいは L-M 軸の sin 波グレーティングを検出する閾値を測定した。結果として、ノイズの色方向がグレーティングの色方向と類似した時、閾値は大きく上昇した。この閾値上昇は non-cardinal 軸でも生じ、すべての色方向に沿った閾値上昇の曲線は、錐体信号の線形結合を仮定したメカニズムの色選択性より狭かった。これらの結果は複数の、錐体応答の非線形結合メカニズムの存在を示唆した。これらのメカニズムは cardinal 軸以外の色方向に感度を持ったメカニズムであるため、高次色覚メカニズムだと考えられる。

最近、順応色から離れた色での多色刺激の弁別感度について調査されている。これはノイズマスキングと前述したペDESTAL 効果との組み合わせと考える事が出来る。例えば、Giesel et al.[58] は、多色テクスチャの平均色度が有彩色となる刺激に対する弁別閾値の変化を測定し、その特性は Sankeralli & Mullen[45] が報告した特性と類似することを明らかにした。さらに、8 つの線形メカニズムで構成されたモデルは cardinal メカニズムモデルよりも実験結果を良く推定可能だった。これらの結果は、共通した複数の色選択性メカニズムで構成された色覚モデル (高次色覚メカニズム) が順応色付近と順応色外の色弁別特性の両方を説明できることを示す。従って、高次色覚メカニズムは順応色を中心に複数の色相方向に感度を持つメカニズムで構成されていると考えられる。

ノイズマスキングによる閾値の変化は cardinal 軸以外にも選択的に生じることが報告されているが、そのような選択的な閾値変化が見られないと報告する先行研究もある [48, 50, 52, 53]。Giulianini & Eskew[50] はランダムに明滅する環状あるいはライン状刺激をノイズとし、テスト刺激をガボール・ガウス分布パッチとして実験を行った。刺激の色は Cone-contrast 空間で定義された。結果として彼らの実験条件ではノイズの色相が変化することによる選択的な閾値変化は見られなかった。

表 2.1 ノイズマスキングを用いた先行研究

著者	色空間	タスク	信号	ノイズ	線形/非線形
non-cardinal	Gegenfurtner & Kiper (1992)[46]	信号検出	ガボール	2次元動的ランダムノイズ	非線形
	Li & Lennie (1997)[47]	領域分割	多色テクスチャ	多色テクスチャ	線形
	D’Zmura & Knoblauch (1998)[49]	信号検出	ガウス分布	時間的な色変化 (セクタノイズ ^{*2})	線形
	Goda & Fujii (2001)[51]	テクスチャ弁別	多色テクスチャ	色分布形状の違い	非線形
	Lindsey & Brown (2004)[54]	信号検出	ガボール	動的ランダムチェッカー	線形
	Monaci et al. (2004)[55]	信号検出	ガボール	多色テクスチャ (セクタノイズ ^{*2})	線形
	Hansen & Gegenfurtner (2006)[56]	領域分割	多色テクスチャ	多色テクスチャ (2組の1次元ノイズ)	線形
	Hansen et al. (2008)[57]	テクスチャ弁別	多色テクスチャ	多色テクスチャ	線形
	Giesel et al. (2009)[58]	テクスチャ弁別	多色テクスチャ	多色テクスチャ + ペデスタル	線形
	Sankeralli & Mullen (1997)[48]	信号検出	ガボール	ローパス白色ノイズ	
	Giulianini & Eskew (1998)[50]	信号検出	ガボール/ガウス分布	バイナリノイズ ^{*3} (点滅する環/水平線)	
	Eskew et al. (2001)[52]	信号検出	ガボール	バイナリノイズ ^{*3} (点滅する水平線)	
cardinal	Newton & Eskew (2003)[53]	信号検出	ガボール	バイナリノイズ ^{*3} (点滅する環)	

^{*1} Cone-Contrast 色空間
^{*2} セクタノイズ: 色空間上で扇形になるノイズ分布
^{*3} バイナリノイズ: 色空間上の2つの色度点をノイズとして使用

Goda & Fujii[51] の実験は多色テクスチャの色分布の 2 次統計量による弁別に着目した研究である。被験者には色分布が異なる多色テクスチャが呈示され、被験者はその 2 次統計量の違いを弁別する。結果として、複数 (5 から 7) の錐体信号の非線形結合メカニズムが推定されている。他のノイズマスキング実験でも呈示刺激として多色テクスチャが利用されているが、そのテクスチャの色分布は 1 次元分布であり特定の色相方向にだけ変化する [56, 57, 58]。このように、色空間上で 2 次元に広がるような多色テクスチャの特性を調査した研究はほとんどなく [44, 47, 51, 60]、十分に検討されているとはいえない。反対色から高次色覚メカニズムへと色情報が変換される際に、色相選択性が広く分布することを考えれば、複数の色相を含んだ多色テクスチャに対する色知覚を明らかにすることは高次色覚メカニズムを理解するのに重要だと考えられる。

2.8.4 心理物理学の逆相関法

伝統的な心理物理学では、順相関法と呼ばれる、刺激の物理量を実験パラメータとして操作し、それが被験者応答に与える影響を逐一実験的に調べる方法を採用していた。それに対し、心理物理学の逆相関法は、多くの試行を通して刺激に適用されたランダムノイズと被験者の応答の相関からメカニズムを調査する手法である [61]。一般的に心理物理学の逆相関法によって得られる結果は、視覚研究の分野では Classification Images と呼ばれる。そして、結果として Classification Images を得る手法の一つである、Classification Image (CI) 法が様々な視覚心理物理実験に利用されてきている。

CI 法は被験者が実験中に知覚決定に用いていた情報を明らかにする手法である。一般的な CI 実験では、2 つの信号のうち無作為に選択された 1 つの信号に対して、試行ごとにランダムに変化するノイズを付加した刺激が被験者に呈示される。被験者は呈示刺激にどちらの信号が含まれていたかを応答する。Ahumada[62] は次のような計算方法で CI を計算した。

$$c = (\bar{n}^{12} + \bar{n}^{22}) - (\bar{n}^{11} + \bar{n}^{21}) \quad (2.23)$$

ここで c は得られた CI、 \bar{n}^{ij} には信号 i が含まれていた刺激に対して被験者が j と応答したノイズカテゴリの平均画像を示す。つまり、 c の値は信号 1 と関連するノイズ成分とは負の相関が、信号 2 と関連するノイズ成分とは正の相関があることになる。

信号に付加されるノイズパターンによって、被験者の応答は「信号 1」が呈示されていたときに「信号 2」と間違っただけで応答したり、「信号 2」が呈示されていたときに「信号 2」だと正確に正しく応答したりする。この被験者の応答の変化はノイズが信号検出に影響しており、 \bar{n}^{11} と \bar{n}^{21} は被験者が「信号 1」だと判断する情報が含まれていると考えることができる。 \bar{n}^{11} と \bar{n}^{21} は同様に「信号 2」だと判断する情報が含まれていると考えられる。これらの情報を式 (2.23) で結合することで、被験者が 2 つの信号を判断する時に使用していた情報が得られる。

CI 法は信号検出のような単純な実験だけではなく、主観的輪郭線 [63] や、表情知覚に

関与する領域の抽出 [64] にも応用されてきている。Gold et al.[63] は 4 つの角によって正方形が見えるカニッツァー錯視の主観的輪郭線を CI 法により抽出した。Kontsevich & Christopher[64] は、ノイズを付加したモナリザが微笑んでいるか、悲しんでいるかを被験者に分類させ、表情知覚には口元が影響していることを明らかにした。

CI 法の利点は、得られる結果が絵的表現であり結果を視覚的に理解できること、および、被験者の知覚判断に関連していた情報に対する解析の自由度が高いことである。伝統的な心理物理学実験では、ある刺激量と被験者応答の関係を調査するために多くの試行を必要とし、得られる結果は弁別閾値のような 1 つの値である。一方 CI 法は、CI を得るために多くの試行を必要とするが、ノイズを別の次元 (例えば空間周波数や標準偏差など) に変換することで、被験者応答と様々な刺激特性との関連性を実験後に検討することができる。

CI 法はヒトの色覚研究にも応用されてきている [60, 65, 66]。例えば、Hansen & Gegenfurtner[60] は色ノイズテクスチャ上の正方形色信号の検出特性を CI 法に基づいて調査した [60]。彼らの研究において、被験者には順応色を中心とした色分布からランダムに選択されたノイズの中に埋もれている色信号刺激が呈示された。色信号は cardinal 軸と non-cardinal 方向の 8 条件であった。色信号は実際に呈示されている場合もあれば、呈示されていない場合もあった。被験者は呈示刺激について、色信号があったかどうかを応答した。これら被験者応答によりカテゴリ (例えば、色信号があったか、なかったか) に分類されたノイズテクスチャから CI が導出された。先行研究で導出された CI は信号が呈示されていた領域が信号色と類似した色に変調された。この変調は cardinal 軸と non-cardinal 方向のどちらでも生じたことから、導出された CI は cardinal 軸が特別な役割を持たないことを示した。CI から推定された色検出メカニズムの感度幅は 30–90° の間で変化した。これらの結果は高次色覚メカニズムの特性を反映していると考えられ、CI 法が高次色覚メカニズム特性を抽出するのに効果的であることを示唆する。

2.9 本章の総括

色覚に関する多くの先行研究により、網膜から LGN までの色情報表現は心理物理学的、生理学的によく理解されており、その特性は錐体コントラスト空間や反対色空間の cardinal 軸としてまとめられている。しかし、Hering が提唱したユニーク色相は生理学的に明らかになった cardinal 軸と一致せず、色情報表現は未解明な点が多い。また、視覚野において cardinal 軸以外の方向に色選択性をもったニューロンが存在することが明らかになっているがその行動的な役割は未解明である。心理物理学的にも cardinal 軸では説明できない現象が様々な刺激とタスクを用いて発見されており、non-cardinal 軸の存在が示唆されているが、その結果は研究グループ間で一致していない。心理物理実験ではノイズマスキングが広く利用されており、1 次元分布を持つ多色テクスチャのノイズ効果はよく調べられているが、2 次元分布を持つ多色テクスチャのノイズ効果は十分に明らかにされてい

るとは言えない。

また、タスク間で同じ色情報表現を調査しているかも明らかではない。弁別と心理量(色の見え)は Fechner の法則によって強く関連づけられており、先行研究でも共通応答関数モデルによって異なる2つのタスクによって得られた結果が説明できることが報告されている [29]。しかし、不完全色順応で示したとおり、弁別と色の見えでは順応の影響が異なり、異なる色情報表現が介在すると予想される。

このように色情報表現の変化を心理物理学的にどのように同定し、特性を決定するのか決定的な手法が存在していない。本論文ではこの問題を色の3属性のうち色相と彩度の観点で検討する。

第 3 章

色覚メカニズムモデルに基づく色コントラスト知覚特性の逆相関解析

3.1 はじめに

第 2 章で述べたように、ノイズマスキングは色情報表現を明らかにするのに広く利用されている。しかし、色空間上で 1 次元分布になる多色テクスチャのノイズ効果はよく調べられているが、2 次元分布を持つ多色テクスチャのノイズ効果は十分に調査されているとは言えない。そこで、本章では 2 次元的な円形分布をノイズとして用いながら CI 法による解析を行うことでノイズ効果を詳細に調査する。CI 法は刺激に適用されたランダムノイズと被験者応答の相関からメカニズムを調査する逆相関法の一つである。CI 法は実験刺激のパラメータ設定に仮定や前提を必要とせずノイズの影響を包括的に解析できる可能性がある。例えば、Hansen & Gegenfurtner[60] は CI 法を多色ノイズ中に埋め込まれた信号色の検出特性を調査するのに利用した。導出された CI は cardinal 軸が信号色の検出に特別な役割を持たないことを明らかにし、cardinal 軸以外のメカニズムの存在を示唆した。

一方で、Eskew[41] は cardinal 軸だけで構成された色覚モデルによって CI 実験のシミュレーションを行い、その結果が Hansen & Gegenfurtner[60] と類似することを指摘した。従って、色覚実験に対して従来の CI 法を適用しただけでは色情報表現のパラメータを推定することは困難だと考えられる。しかしながら、CI 法の解析は数理的な解析手法と組み合わせることで発展してきている [67]。例えば、試行ごとの刺激に対する被験者応答を再現するモデルパラメータを推定するような、より洗練された手法によって高次色覚メカニズムの特性を明らかにできると考えられる。

本章では、Hansen & Gegenfurtner[60] と同様に知覚的な色コントラストの調査に CI 法を適用した。しかしながら、本章の実験は彼らの実験といくつかの点で異なる。まず、CI 実験の結果からロジスティック回帰分析を用いて被験者の振る舞いをより良く再現する色覚モデルパラメータを推定した。一般的に、CI は被験者応答と空間的位置やタイミングのような刺激パラメータとの相関を表現する。同様に、刺激の色度を色覚メカニズムの

応答に変換すれば、被験者応答と色覚メカニズムの応答の間の相関を導出できる可能性がある。この相関は色コントラスト知覚に内在する色覚メカニズムの特性(メカニズムの数や方向、選択性など)を示唆すると考えられる。上述したように、CI実験の結果を単純に解析しただけでは cardinal 軸と non-cardinal 方向の色覚メカニズムで構成されたモデルを区別できない。対照的に、本章のアプローチはこの問題を解決すると期待でき、色コントラスト知覚に内在する色覚メカニズムの洞察を与えると考えられる。次に、本章では色分布条件の変化による色知覚特性を調査するために、ノイズテクスチャの色分布の中心が順応色外(away 条件)の場合と順応色(near 条件)の場合の両方を実施した。先行研究において、near 条件と away 条件では色弁別特性が異なり、またその違いには高次色覚メカニズムが関与することが示唆されている[45, 58]。従って、色分布の中心位置によって色知覚特性が変化する可能性がある。最後に、タスクと刺激呈示条件を変更した。彼らの実験では被験者は多色テクスチャ中に信号色があるかどうかを答えていた。このタスク・実験手続きは判断基準の違いが結果に影響する可能性がある。このような被験者の判断基準の影響を小さくするために、本章では単純な判断タスクを二肢強制選択法(two alternative forced choice task; 2AFC)によって実験をした。

3.2 実験1: CI 実験

3.2.1 実験装置

呈示刺激は CRT ディスプレイ FlexScan T766 (EIZO、石川、日本) に呈示された。CRT ディスプレイのリフレッシュレートは 120Hz、解像度は 1024×768 pixel に設定した。実験は全て GeForce GTS 240 グラフィックボード (NVIDIA、Santa Clara、USA) を搭載した PC により制御されるが、制御プログラムは MATLAB (MathWorks、Natick、USA) と、Psychtoolbox[68, 69] を用いて作成した。刺激は Bits++ (Cambridge Research System; CRS、Rochester、UK) を通して呈示することで、RGB それぞれについて 14 bit の階調を使用することができた。被験者は暗室内で刺激が呈示される CRT ディスプレイを両眼で観察した。暗室内に CRT ディスプレイ以外の発光体は無かった。被験者の頭部はあご台により固定され、視距離は CRT ディスプレイから 57 cm であった。

一般的に CRT ディスプレイやグラフィックボードの放射輝度は、デジタル出力と線形ではない。そのため、物理量と被験者応答を結びつける心理物理実験を行う際には、デジタル出力と CRT の放射輝度が線形になるように較正が必要である。CRT ディスプレイの RGB 各蛍光体の分光分布(三刺激値)を SR-3AR (トプコン、東京、日本) で測定し、ガンマカーブを ColorCAL II (CRS、Rochester、UK) により測定した。CRT ディスプレイの較正は一ヶ月に一度の頻度で行った。

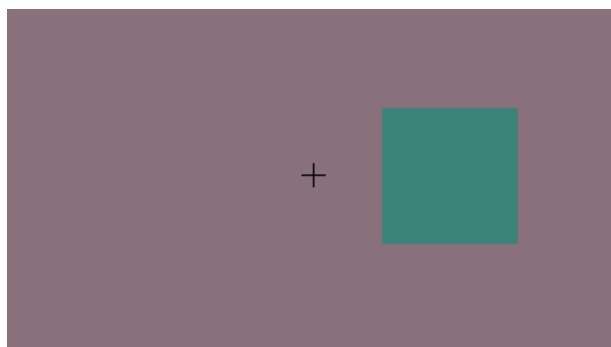


図 3.1 正規化のための予備実験における呈示刺激

DKL 色空間の原点から cardinal 軸の内一つの値が正負どちらかに変化した信号が左右どちらかに呈示された。この図の場合は、L-M 軸負方向に変化した場合の色信号である。

3.2.2 色空間

呈示刺激の色は Smith & Pokorny[1] の錐体応答感度で定義した DKL 色空間 [35, 36] の等輝度平面上で決定された。DKL 色空間の原点は $(x, y) = (0.333, 0.321)$ (CIE 1931) で輝度は $20\text{cd}/\text{m}^2$ だった。DKL 色空間は 3 つの cardinal 軸: 輝度、L-M、S-(L+M) から構成される。ここで L、M、S は錐体応答をそれぞれ示す。DKL 色空間の各軸は、次節に示す予備実験により測定した各被験者の各軸に対する弁別閾値によって正規化された。

3.2.3 DKL 色空間正規化のための予備実験

呈示刺激

DKL 色空間の正規化のための予備実験において、図 3.1 に示すような DKL 色空間の各軸の内一つ (輝度軸か L-M 軸、S-(L+M) 軸のいずれか) の値が正負どちらかに変化した信号が被験者に呈示された。各被験者について実験条件は 6 条件 (3 (各軸) \times 2 (正負)) であった。

実験手続き

被験者のタスクは、左右のどちらに信号色が呈示されていたか、刺激呈示後か刺激呈示中にマウスクリックを通して応答することであった。実験手続きとして階段法 [37] を用いた。呈示刺激強度の上昇・下降は 1 up 2 down (1 回の不正解で刺激強度上昇、2 回の正解で刺激強度下降) とし、実験の終了条件は刺激強度変化の折り返し 8 回とした。1 つのセッション中には、各条件について上昇系列と下降系列の階段が実施された。実験により得られた結果に対して心理物理関数を最尤推定により当てはめ、75 % 閾値を計算した。心理測定関数の最尤推定には psignifit (<http://bootstrap-software.org/psignifit/>) を使用した。各軸の正負の閾値の絶対値をとり、その平均値を各被験者の DKL 色空間の 3 軸の弁

別閾値とした。

3.2.4 呈示刺激

図 3.2 に呈示刺激例を示す。呈示刺激は信号画像とノイズ画像を、色空間の原点である灰色の背景上で 60Hz のフリッカーで重ね合わせるにより生成される。ノイズ画像は 12×24 の正方形パッチから構成されるテクスチャであった。ノイズ画像の大きさは視野角 $3 \text{ deg} \times 6 \text{ deg}$ であった。テクスチャを構成するパッチの色度は、等輝度平面上の一樣円分布から無作為に選択された。本研究では大きく分けて順応色付近 (near 条件) と順応色外 (away 条件) のノイズ分布を使用した。near 条件の場合、図 3.3(a) に示すように一樣分布の中心は色空間の原点であった。away 条件の場合、図 3.3(b) に示すように一樣円分布の中心は等輝度色空間上で $(L-M, S) = (20, 20), (-20, 20), (-20, -20), (20, -20)$ の 4 つであり、これらはそれぞれ non-cardinal 軸である $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ と一致する。ノイズの色分布の半径は等輝度平面上で 20 でとした。

信号画像は 2 つの均一な正方形から構成され、その正方形はノイズ画像のうち 6×6 のパッチを覆う大きさであった。2 つの正方形は左右のノイズテクスチャ (12×12 パッチ) の中心に位置した。2 つの正方形は同一な信号色であった。near 条件のノイズに対して、信号色は non-cardinal 方向の一つで、 $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ のいずれかであった。away 条件のノイズに対して信号色はノイズ分布の中心方向と一致する方向であった (例えば、 45° のノイズ分布に対する 45° の信号方向)。従って、本研究では 8 条件の異なる呈示刺激があった (4 つの信号色に対して 2 つのノイズ条件)。各信号色のコントラスト (図 3.3(c) の矢印の長さで示すように色空間上での原点からの距離) は、被験者ごとに予備実験により測定されたノイズ中の 75 % の確率で検出できる閾値とした。この刺激において重要な点は、左右両方に同じ色信号が呈示されているにもかかわらず、被験者が知覚する二つの色信号のノイズテクスチャ中での色コントラストが、各試行のノイズパターンによって変化することである。

3.2.5 実験手続き

被験者は各セッション前に、3 分間順応色である灰色背景に順応した。各試行において、刺激は 0.75 秒間呈示された。ヒトの視覚系において、輝度変化と色変化に対する時間的コントラスト感度関数は、それぞれ高周波側と低周波側で感度がよい [23]。本研究では輝度ではなく、色変化に対するヒトの知覚特性を調査するために、刺激呈示を低周波にした。刺激呈示中に刺激のコントラストは、最初の 0.25 秒でコサイン波状に増加し、中間の 0.25 秒間最大コントラストで呈示され、そして、最後の 0.25 秒でコサイン波状に減少する。被験者は、左右の信号正方形のどちらがより強い知覚の色コントラストを持つかを、マウスクリックを通して刺激の呈示後または呈示中に応答した。固視点はセッション中を通して呈示されていた。1 セッションでは各実験条件 100 試行ずつ行われた。各被

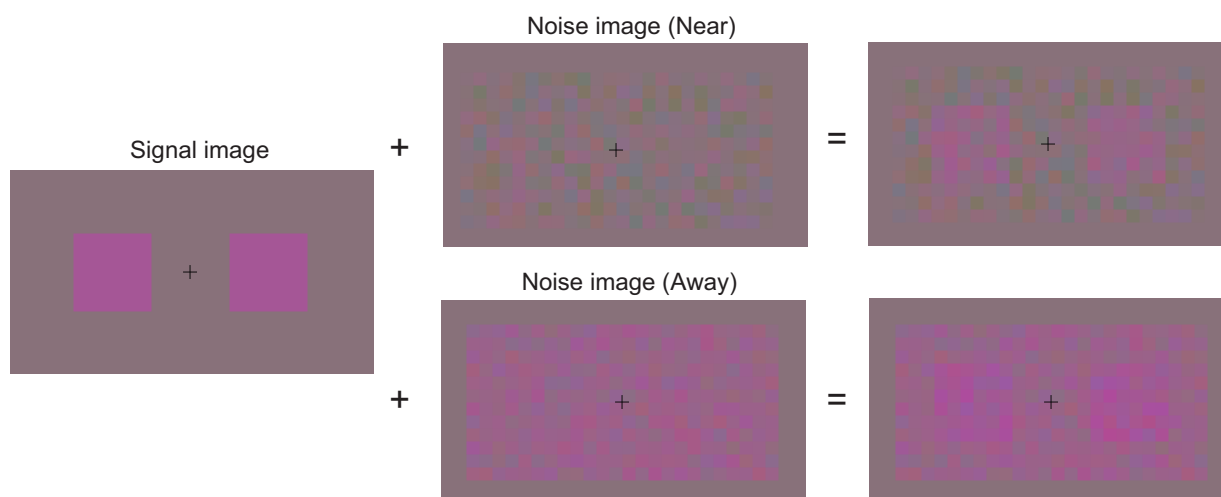


図 3.2 信号色 45° の場合の呈示刺激例

信号画像 (左) とノイズ画像 (中央) が 60Hz のフリッカーによって合成される。被験者の刺激の見えは 2 つの信号色が多色ノイズに埋め込まれているように見える (右)。ノイズは 2 条件あり、near 条件 (中央列上) と away 条件 (中央列下) であった。

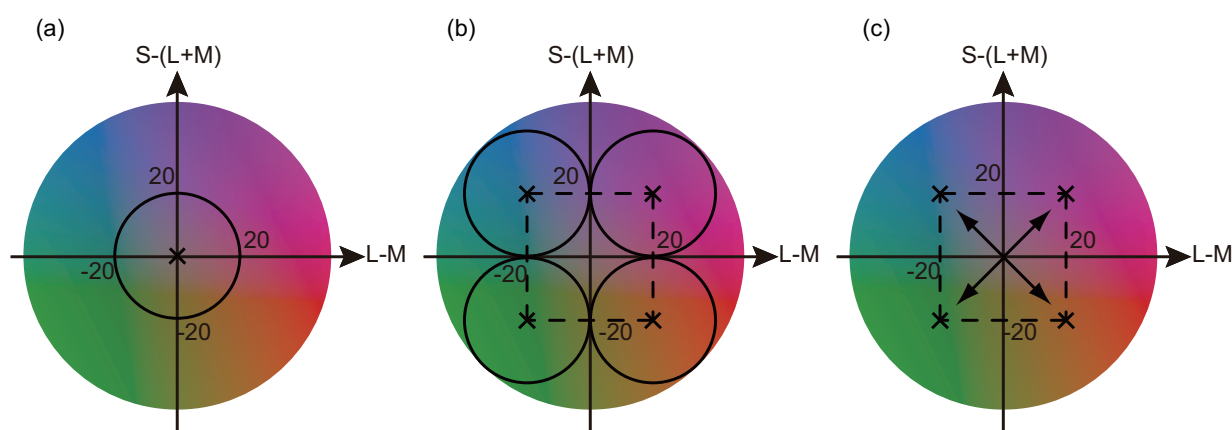


図 3.3 DKL 色空間上でのノイズ分布と信号色の色度

(a) near 条件のノイズ分布 (黒い実線の円内の領域) (b) away 条件のノイズ分布: 分布の中心は信号色条件によって 4 つの象限に位置する。分布の半径は DKL 色空間上で 20 であった。(c) 信号色の色度: 矢印の長さは信号色のコントラストの例を示す。コントラストは信号色がノイズに埋め込まれた場合の 75% 閾値であり、予備実験で被験者ごとに設定された。

験者について、実験条件ごとに合計で 1000 試行ずつデータを収集した。

被験者の順応状態は色コントラスト知覚に影響する。しかし、実験セッション中、被験者には灰色の背景とノイズテクスチャが呈示された。near 条件の場合、平均色度は色空間の原点であった。away 条件の場合、色空間上の各象限のノイズが等しい確率で呈示され、特定の色相に偏っていなかった。従って、被験者の順応状態は DKL 色空間の原点で固定

されていたと考えられる。

3.2.6 基礎解析

試行ごとのノイズ画像の左右それぞれの 12×12 のテクスチャ (信号画像は含まれない) は、被験者応答に従って 2 つのカテゴリ (Higher カテゴリと Lower カテゴリ) に分類された。例えば、被験者がある試行において“左”と応答した場合、左側のノイズテクスチャは Higher カテゴリに分類され、右側のノイズテクスチャは Lower カテゴリに分類される。全試行のノイズテクスチャがカテゴリに分類されたあと、各カテゴリにおいてノイズの色がパッチごとに平均された。そして、2 つのカテゴリ間の平均ノイズテクスチャの差を計算することで CI を導出する。導出される CI の j 番目の要素を C_j とすれば、

$$C_j = \frac{1}{M} \sum_i^M = 1[N_{i,j}(\text{Higher contrast}) - N_{i,j}(\text{Lower contrast})] \quad (3.1)$$

となる。ここで N はノイズテクスチャ、 M は実験条件ごとの全試行数 (1000 試行)、 i はある試行のテクスチャ、 j はテクスチャの要素をそれぞれ示す。各 CI は 144 個の要素を持っていた。

3.2.7 被験者

4 名の被験者 (TN、TS、YN、YO) は全ての実験に参加した。被験者 HK は away 条件にだけ参加した。すべての被験者はパネル D-15 テストと、石原式色覚異常検査表により正常色覚であることが確認された。また、すべての被験者は正常、あるいは矯正により正常な視力を有していた。被験者 TN と TS を除いて、すべての被験者は実験目的について知らされていなかった。

なお、本実験は国立大学法人豊橋技術科学大学安全衛生委員会「ヒトを対象とする研究」審査会の承認を受けて行われた。

3.2.8 結果と考察

被験者 YO の実験データから得られた CI を図 3.4 に示す。CI の中心領域付近はノイズが見られるが信号色とノイズ条件の組み合わせに依存して強い色変調が見られた。CI における色度は被験者の色コントラスト判断に影響したノイズ要因が含んでいると考えられる。全被験者で平均した CI を図 3.5 に示す。被験者間平均した CI は図 3.4 に示した YO の結果よりもノイズが少なく見える。これはより多くのテクスチャが CI を導出するのに使用されたためである。従って、被験者間平均した CI において色変調がはっきりと確認できた。前述したように、CI に含まれた色は信号色に依存して変調されているようにみえる。特に、信号色が呈示されていた中央領域 (黒い枠で囲まれた領域) は信号色に類似した色が集中した。例えば、away 条件、信号色が 45° の場合、中央領域は赤っぽく 45° 方

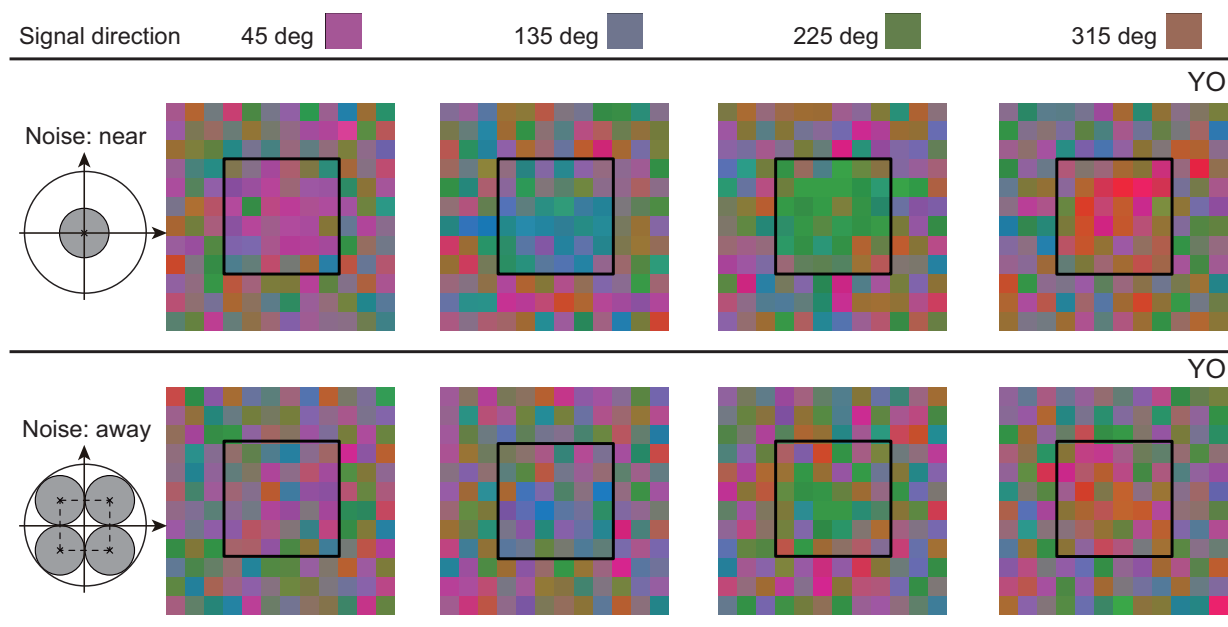


図 3.4 被験者 YO の実験データから導出された CI

黒い枠で囲まれた部分は信号色が呈示されていた領域を示す。CI の色コントラストは拡張してある。

向の色に類似した。これは信号色と類似した色のノイズが信号検出に寄与した事を示す。対照的に、背景領域の色は信号領域と比較してかなりノイズが多かった。しかし、信号領域付近の色は信号色と反対方向の色に変調されているように見える。例えば、away 条件、45° 信号の場合、信号領域の外側の部分は緑色になっているように見える。これらの結果は被験者の信号色判断が信号領域と背景領域の両方の情報を用いて行われた事を示唆する。これらの CI における空間的な特性は near 条件と away 条件で違いは見られなかった。

CI の色変調をより詳しく調査するために、信号領域と背景領域の平均色度をそれぞれ計算した。ここで計算した平均色度を優先色 (chromatic preference; CP) と呼ぶ。図 3.6、3.7 に各ノイズ条件で計算した CP をそれぞれ示す。まず、背景領域の CP は信号領域の CP よりも原点からの距離が小さいが、信号領域の CP とおよそ反対色方向 (原点に対して対称な方向) となった。これは信号領域と背景領域に反対方向の色が存在することで、信号色の知覚的コントラストが大きくなったことを示している。さらに、信号領域の CP の変調方向は信号色の方向と類似しているが必ずしも一致しない事がわかる。これら CP と信号色の間の差は CP が単に信号色を再現しただけではない事を示唆する。代わりに、CP は色コントラスト判断に内在する色覚メカニズム特性を反映していると考えられる。

CP と信号色のずれを詳しく調査するために、図 3.8 に示すように CP と信号色の間の色相における差を計算した。最初に、CP のずれは被験者によって明らかに異なった。例えば、信号色 45° の away 条件における HK と TS の CP は 90° 異なった。次に、各信号色の CP は near 条件と away 条件で同一被験者であっても異なった。例えば、TS の信号色 45° における CP のずれは near 条件では 0°、away 条件では -45° だった。最後に、被験者間

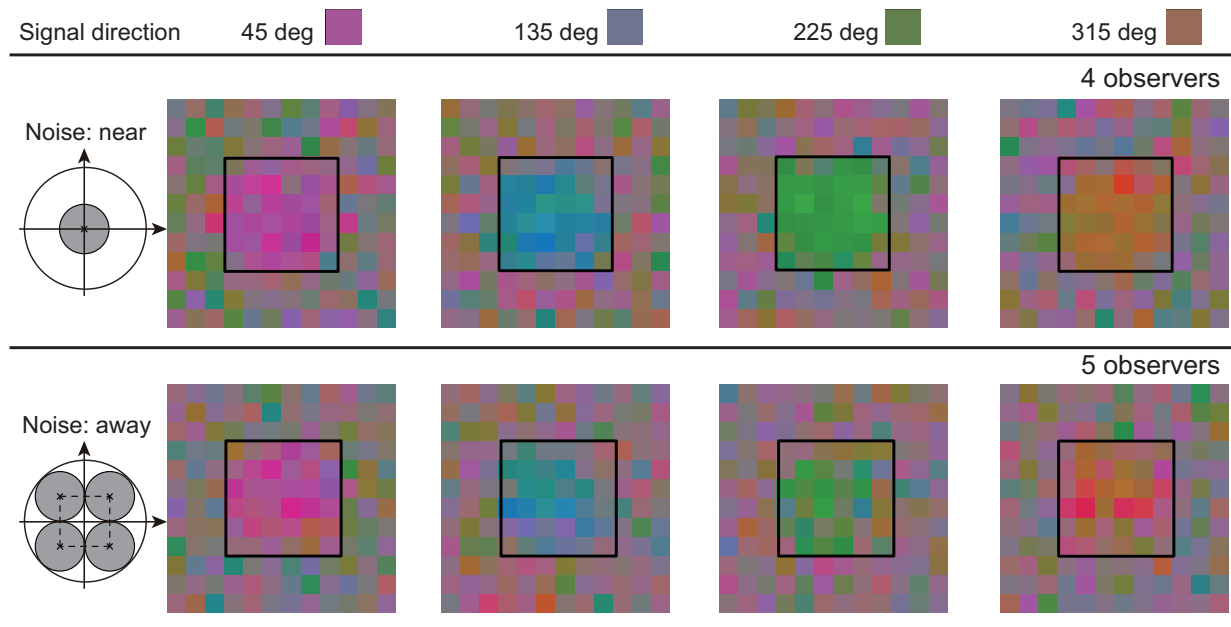


図 3.5 被験者間平均により導出された CI

黒い枠で囲まれた部分は信号色が呈示されていた領域を示す。CI の色コントラストは拡張してある。

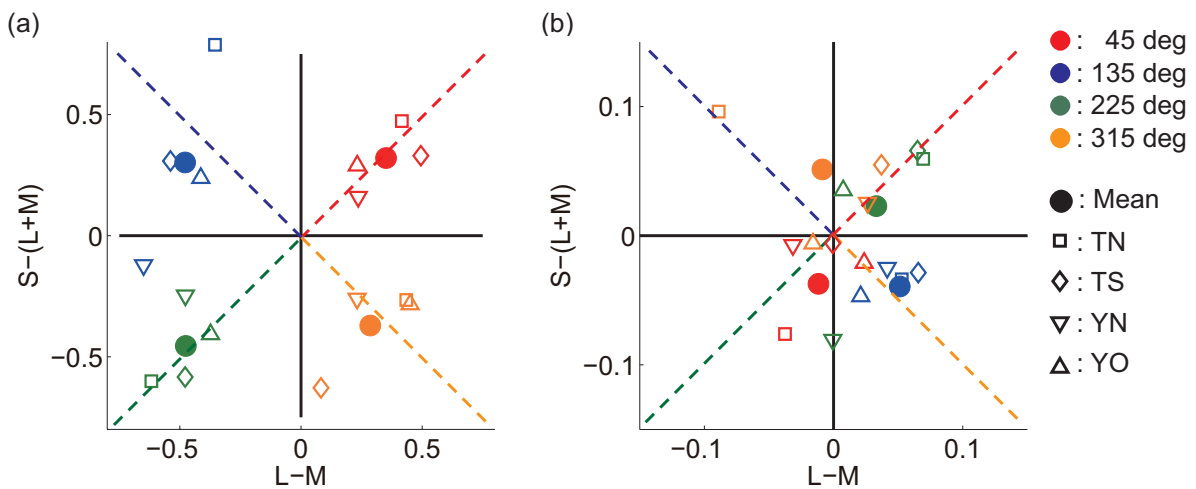


図 3.6 near 条件の CI から計算された優先色 (CP)

(a) 信号領域、(b) 背景領域: 信号色条件は異なる色でプロットしてある。塗りつぶし丸は被験者間平均した CP を示し、異なるプロット点の形状は各被験者の CP を示す。各象限の破線は実験に使用した信号色の方向を示す。

平均した CP のずれは near 条件と away 条件で異なっていたように見える。これらを総合すると、図 3.6–3.8 は信号色や背景色の条件、被験者による CI の色特性の違いを示すと考えられる。もし条件間、被験者間の違いが高次色覚メカニズムの特性を反映していたとすれば、より詳細に解析することで高次色覚メカニズムを明らかにすることが出来るだろう。

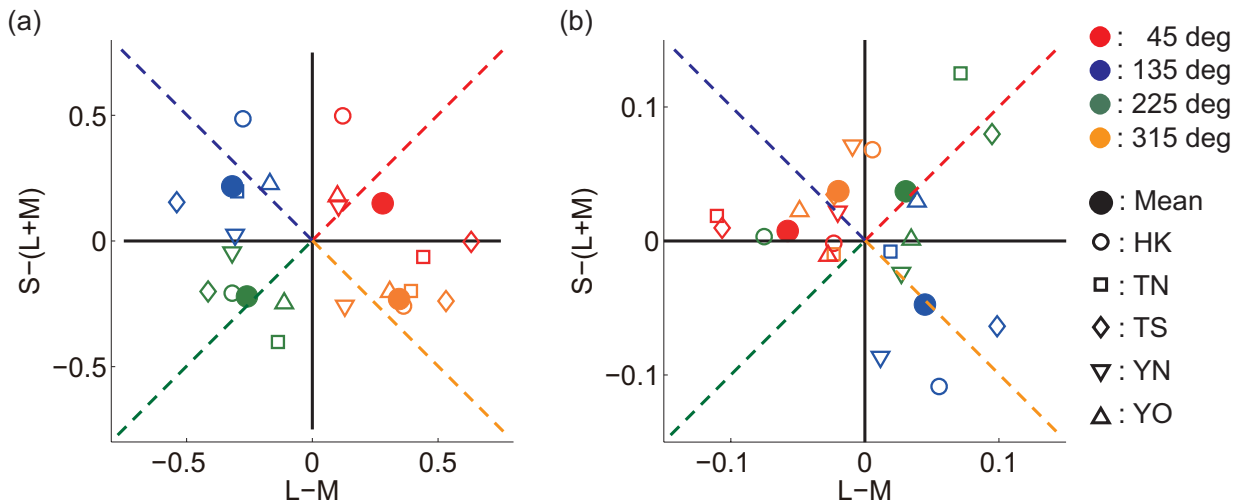


図 3.7 away 条件の CI から計算された優先色 (CP)

(a) 信号領域、(b) 背景領域: 図のフォーマットは図 3.6 と同じである。

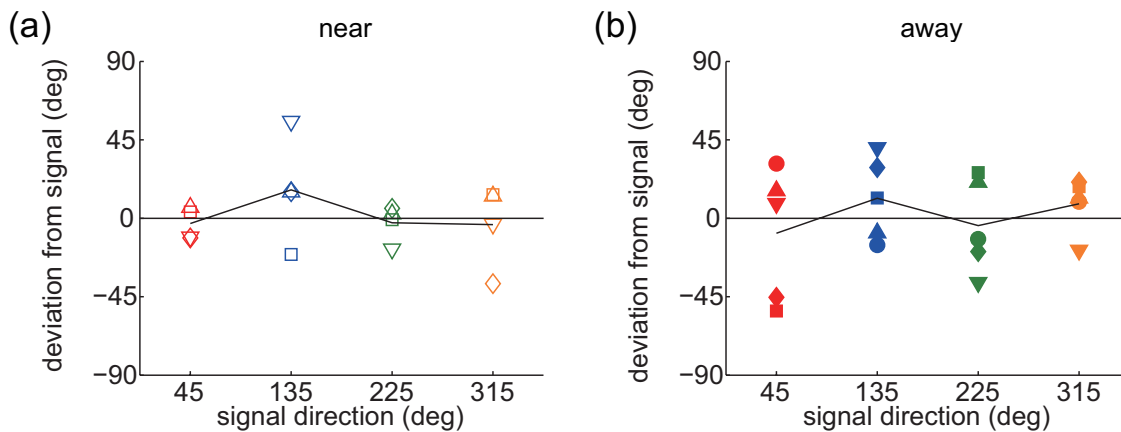


図 3.8 信号領域の優先色 (CP) と信号色間の色相差

(a) near 条件、(b) away 条件: 黒い実線は被験者間平均した結果を示す。異なるプロット点は図 3.6 と同様に異なる被験者の結果を示す。

しかしながら、いくつかのアーティファクトが CI の色特性に含まれている可能性がある。例えば、課題遂行に関わる色覚メカニズムには個人差がなくても、各被験者の応答判断基準の不安定さによって、あたかも個人差があるように見えている可能性が考えられる。そこで、各被験者の応答基準の安定度を調べるために、各被験者の信号領域の CP を前半 500 試行と後半 500 試行のデータに基づき別々に計算した。ちなみに、前半と後半のデータは、異なる日の実験により得られたものである。図 3.9 に前半 500 試行と後半 500 試行の間の CP 方向とシグナル方向のずれの関係性を示す。near 条件では、全てのデータ点が対角線上に集まり、相関係数 0.89 と非常に強い正の相関が見られた。away 条件では、多くの点是对角線上に集まり、near 条件よりも弱い相関係数 0.59 という強い

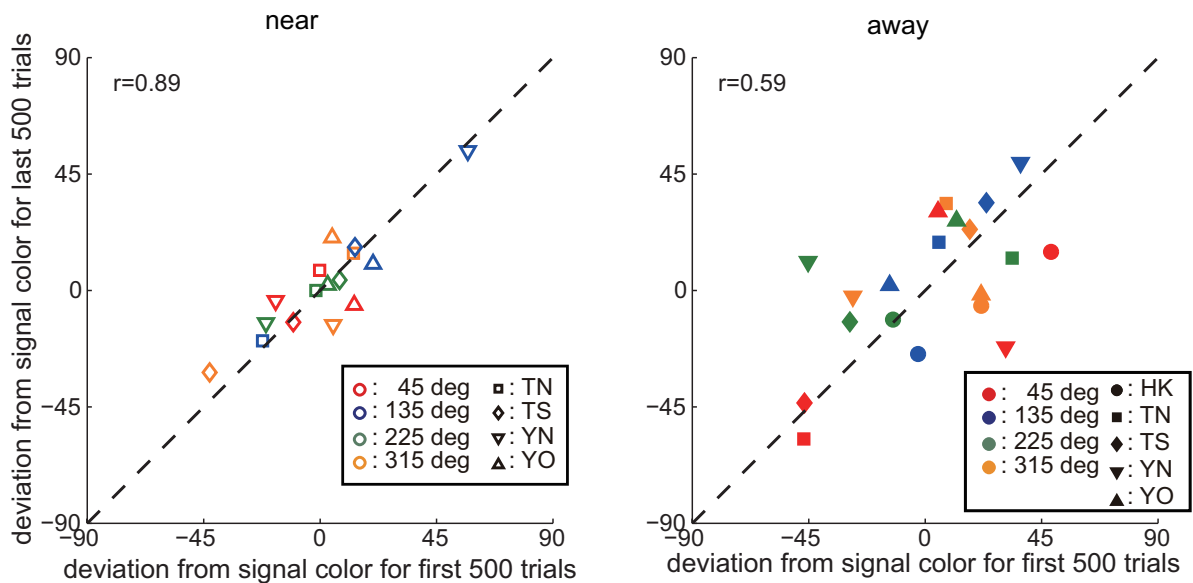


図 3.9 前半 500 試行と後半 500 試行の CI から計算された信号領域の優先色 (CP) 間の相関

正の相関が見られた。away 条件の相関が near 条件の相関よりも小さいのは被験者 YN の不安定なデータが原因である可能性がある。YN のデータ点は有意に対角線から離れており、これは図 3.7 に示したように YN の CI における色変調が弱いことが原因だと考えられる。YN のデータを除いて相関を計算したところ、near 条件は 0.86、away 条件は 0.74 となった。これらの強い正の相関は CP の実験条件間における違いが実験セッションごとの被験者の判断基準の変化が原因でない事を示唆する。

上述したように、CP の方向は信号色やノイズ、被験者内、被験者間で異なった。これらの結果は今回の実験に関与した色覚メカニズムの特性において差がある可能性を示唆する。次の節において、この差について色覚メカニズムモデルに基づいた解析を用いて調査する。この解析において、被験者と実験条件による CI の色特性の差を説明可能なパラメータが何か決定された。

3.3 色覚メカニズムモデルに基づく CI 解析

本章では被験者の色コントラスト判断のパフォーマンスを説明可能な色覚メカニズムの特性を調査するために CI データを再解析した。再解析に使用した色覚モデルは、複数の色選択メカニズムから構成され、色選択メカニズムの応答は CI 実験により得られたノイズテクスチャから計算された。各メカニズムは右と左のノイズテクスチャ間の色コントラスト応答の差分を出力する (図 3.10(b))。その後、メカニズム応答差の線形結合が刺激の左右どちらがより高コントラストだったかを決定する (図 3.10(a))。モデルのパラメータはロジスティック回帰分析によって被験者応答とモデルの振る舞いが合致するように最適

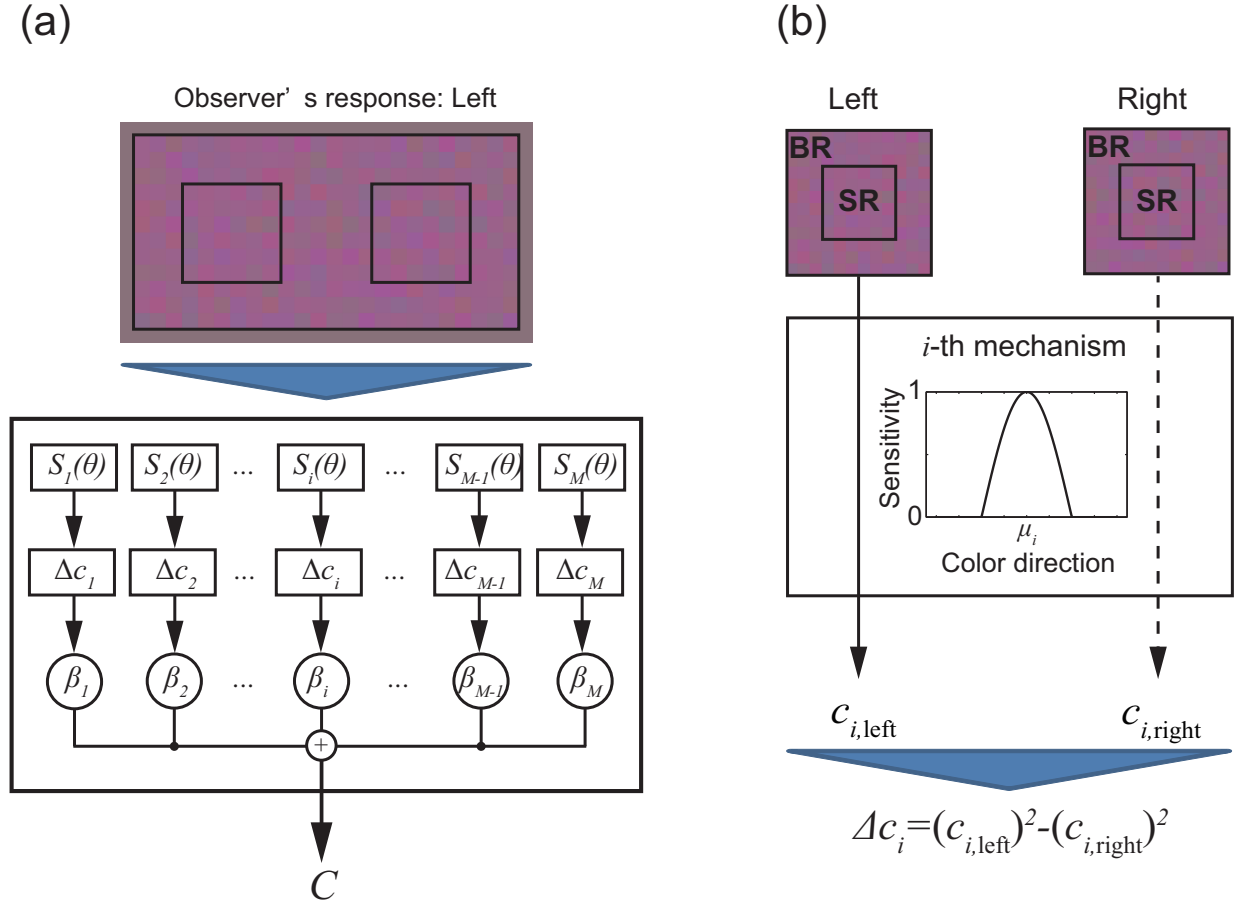


図 3.10 モデル概念図

(a) 左右間の信号領域と背景領域の色コントラストの差 C の計算手続きの概念図 (b) 刺激の色度を i 番目のメカニズムの色コントラストの差分 Δc_i を計算する概念図

化された。

3.3.1 色覚メカニズムモデル

モデルは DKL 色空間の等輝度平面上で定義された複数の色選択性メカニズムから構成された。まず、モデルを構成する候補となる様々な色相方向と感度幅をもつメカニズムを用意した。 i 番目のメカニズムは色相方向に沿ってコサイン波が半端整流された感度 S_i を持つ。 S_i は、

$$S_i(\theta) = \begin{cases} \cos^k(\theta - \mu_i) & \text{for } |\theta - \mu_i| \leq 90^\circ \\ 0 & \text{for } |\theta - \mu_i| > 90^\circ \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\mu_i = 360 \times \frac{i}{N} \quad (3.3)$$

と定義された。ここで、 θ は刺激の色方向、 μ_i はメカニズム感度ピーク、 N は異なる色方向に感度ピークを持つメカニズムの総数、 k はメカニズムの感度幅を制御するパラメー

タである。 k が 1 の場合、そのメカニズムは広帯域であり cone-opponent 信号の線形結合であることを示す。一方で、 k が 1 より大きい場合、そのメカニズムはより狭帯域なメカニズムとなる。ここでは $N = 72$ 、 $k = 1, 2, 4, 8$ とし、合計で 288 個のメカニズムを仮定した。ここでは、計算コストを削減するために N の総数と k の値を制限した。 $k = 8$ は cone-opponent 信号の線形結合と比較するのに十分狭帯域だと考えられる。

呈示刺激の色に対する応答は彩度 (原点からの色度の距離) r とその色の色相方向に対する感度 S_i で計算された。従って、呈示刺激のある領域 A に対する平均応答 $R_{A,i}$ と標準偏差 $SD_{A,i}$ は

$$R_{A,i} = \frac{1}{||A||} \sum_{j \in A} r_j S_i(\theta_j) \quad (3.4)$$

$$SD_{A,i} = \sqrt{\frac{1}{||A|| - 1} \sum_{j \in A} (r_j S_i(\theta_j) - R_{A,i})^2} \quad (3.5)$$

と定義された。ここで r_j と θ_j はそれぞれ j 番目のパッチの彩度と色相を示す。 $||A||$ は領域 A に存在するパッチの総数を示す。ここでは信号領域 SR と背景領域 BR の 2 つの領域を定義した。ノイズテクスチャが与えられたとき、各メカニズムは各領域 SR と BR に対してそれぞれ $R_{SR,i}$ と $R_{BR,i}$ を出力する。ここで、2 つの領域間のメカニズム応答の差が信号色と背景の間のコントラストの指標になると考えられる。従って、 i 番目のメカニズムの色コントラスト c_i は

$$c_i = \frac{R_{SR,i} - R_{BR,i}}{(SD_{SR,i} + SD_{BR,i})/2} \quad (3.6)$$

と定義された。ここで $R_{SR,i}$ と $R_{BR,i}$ は右と左のノイズテクスチャの対応した領域でそれぞれ計算された。刺激の右と左の信号領域のどちらがより高コントラストかを決定するために、 c_i の差分 Δc_i を

$$\Delta c_i = (c_{i,\text{left}})^2 - (c_{i,\text{right}})^2 \quad (3.7)$$

とした。ここで、 $c_{i,\text{left}}$ と $c_{i,\text{right}}$ はそれぞれ刺激の右と左の色コントラストを示す。コントラスト値は正の値となるように二乗された。 Δc_i が 0 の場合、刺激の左右両方の色コントラストが i 番目のメカニズムにとって同一だったことを意味する。ここで、モデルは複数のメカニズムの Δc_i と係数 β_i の線形結合 C に基づいて、入力された画像の左右どちらがより高いコントラストをもつか判断すると仮定した。係数 β_i は次の節で説明するロジスティック回帰分析によって推定された。 C は

$$C = \sum_{i=1}^M \beta_i \Delta c_i \quad (3.8)$$

で計算された。ここで、 M はモデルに含まれるメカニズムの総数を示す。

3.3.2 マルチプルメカニズムモデルの解析

本章では各メカニズムの応答に対する係数 β_i をロジスティック回帰分析によって推定した。ロジスティック回帰分析は一般化線形モデルの一つである [67, 70]。一般化線形モデルでは、ある非線形関数をリンク関数を通して線形関数へと変換する。ロジスティック回帰ではロジスティック関数をリンク関数として使用する。本研究では被験者応答を目的変数、各刺激から計算された Δc_i を説明変数としてロジスティック回帰分析を実施した。従って、ロジスティック回帰のためのモデルは、

$$\text{logit}(E[y]) = C = \sum_{i=1}^M \beta_i \Delta c_i \quad (3.9)$$

と表される。ここで、 y は被験者応答 (0: 右、1: 左)、 $E[y]$ は y の期待値である。このモデルでは、 C の値が大きいくほど左と応答する確率が大きくなる。

同時に、ステップワイズ法によって 288 の仮定されたメカニズムの中から CI データをより効果的に説明可能ないくつかのメカニズムが選択された。ステップワイズ法では、いくつかの説明変数 (ここでは Δc_i) が、多くの候補の中からある判断基準に基づいて目的変数を最もよく説明するものとして選ばれた。ここでは判断基準として赤池情報量基準 (Akaike Information Criterion; AIC) を用いた。ここではフォワードステップワイズを用いており、ステップ数は 1 から 8 とした。このステップ数はほとんどの場合、選択された説明変数の数と一致する。しかし、ステップワイズ法を進めている間に AIC を改善するためにすでに追加した説明変数を除去することもあるので、ステップ数と説明変数の数が一致しない場合もある。マルチプルメカニズムモデルのステップワイズ・ロジスティック回帰による解析方法をまとめると、

1. 被験者応答を効果的に説明する色メカニズムを 288 の候補から選択
2. 被験者応答とモデルの振る舞いが最もよく一致するようにメカニズムの係数 β_i を推定

の 2 段階となる。ロジスティック回帰分析による最適化は MATLAB の一般化線形モデルのクラスを利用した。

3.3.3 Cardinal モデルの解析

ステップワイズ・ロジスティック回帰によるマルチプルメカニズムモデルの解析に加えて、より単純な cardinal モデルについても同様な解析をした。ここで使用した解析モデルは前述したマルチプルメカニズムモデルと非常によく類似しており、モデルが 0° 、 90° 、 180° 、 270° に感度を持ち、 k が全て 1 であったこと以外は同一解析である。ロジスティック回帰分析によって、被験者応答とモデルの振る舞いが一致するように 4 つのメカニズム

の係数 β_i が推定された。マルチプルメカニズムモデルの解析とは異なり、ステップワイズの手続きは省いた。

3.3.4 入力データ

ロジスティック回帰に使用されたデータはノイズ画像とそれに対する被験者応答の組み合わせである。ここでは near 条件・away 条件の両方に参加した被験者 4 名 (TN、TS、YN、YO) のデータを使用した。モデルの最適化は入力データの違いによって次の 3 通りであった。

1. near 条件のデータのみ (near)
2. away 条件のデータのみ (away)
3. near 条件・away 条件の両方のデータ (all)

3.3.5 最適化されたモデルの検証

ステップワイズ・ロジスティック回帰を用いて、モデルに含まれるメカニズムの感度方向や感度幅、その重み付け (感度に相当) がステップ数ごとに最適化された。この最適化されたモデルが被験者の結果を再現できるかどうかシミュレーションにより確認した。モデルの刺激に対する応答確率は C によって決定され、モデルの応答は C の確率分布によってランダムに決定された。モデルは CI 実験を 1000 セッション繰り返した。各セッションは各実験条件 1000 試行から構成された。シミュレーションにおける信号画像は実際に被験者に呈示したものと同一だった。ノイズ画像は実験条件に対応したノイズ分布から試行ごとに新しく作成された。実際の CI 実験と同じ手順で、CI と CP がシミュレーション結果として計算された。

3.3.6 シミュレーションの解析

本研究で使用したモデル解析が cardinal モデルのみ、あるいは non-cardinal モデルのみから得られた CI を区別できるかどうか、仮想被験者によるモンテカルロシミュレーションを用いて検証した。まず、CI データは cardinal メカニズムのみを持つ仮想被験者と non-cardinal メカニズムのみを持つ仮想被験者によって生成された。cardinal メカニズムは 4 つのメカニズムの感度ピーク方向が 0° 、 90° 、 180° 、 270° の 4 つだった。non-cardinal メカニズムは 4 つの 45° 、 135° 、 225° 、 315° に感度ピークを持ったメカニズムから構成された。これらのメカニズムのパラメータの β と k は 1 とした。これら 2 つの仮想被験者の CI 実験における応答は導出された CI に対してそれぞれシミュレートされた。実験条件は near 条件とし、信号色のコントラストは 7 とした。つぎに、シミュレーションにより得られた CI データは、マルチプルメカニズムモデル解析のステップ数 4 と cardinal モデル

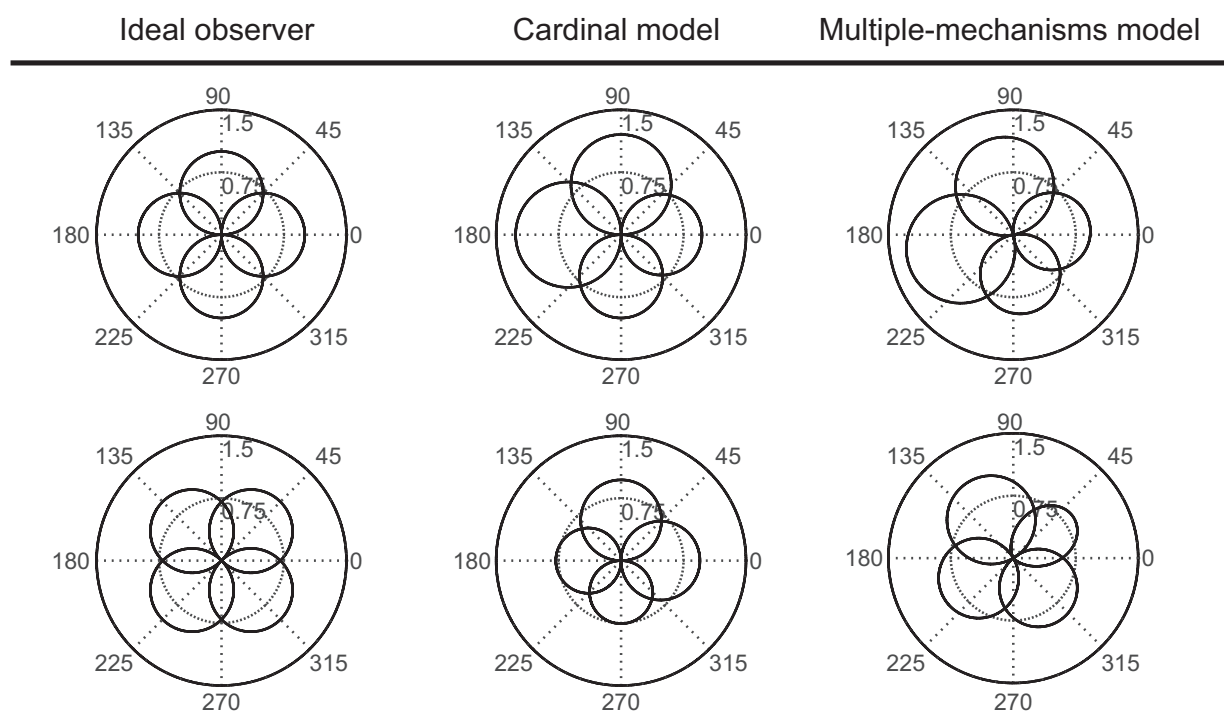


図 3.11 仮想被験者による検証

仮想被験者 (左列) のシミュレーション結果から Cardinal モデルによって推定されたメカニズム (中央列) とマルチプルメカニズムモデルによって推定されたメカニズム (右列) を示す。上段は仮想被験者が Cardinal メカニズムのみ、下段は Non-cardinal メカニズムのみで構成されている場合を示す。

によって解析された。もし、本研究で提案した解析が cardinal メカニズムと non-cardinal メカニズムを区別する能力を持つならば、non-cardinal メカニズムによって構成された仮想被験者の解析結果はマルチプルモデルと cardinal モデルで異なるべきである。また、cardinal メカニズムの仮想被験者の結果は両方の解析で同一になるはずである。

図 3.11 に示した仮想被験者のシミュレーション結果によれば、non-cardinal メカニズムの仮想被験者に対して、マルチプルメカニズムモデルは仮想被験者とほぼ同じメカニズムを推定することが出来た。cardinal モデルによる解析はもちろん仮想被験者の non-cardinal メカニズムを推定することはできなかった。一方で、cardinal メカニズムの仮想被験者に対して、マルチプルモデルと cardinal モデルによる解析は仮想被験者のメカニズムとほとんど同じメカニズムを推定することが出来た。これらのシミュレーション結果は、本章で提案した解析手法が CI データが cardinal と non-cardinal メカニズムのどちらに基づいているのか明らかにする能力を持つことを示す。

3.3.7 結果と考察

本解析でマルチプルメカニズムモデルと cardinal モデルによる最適化の AIC を計算した。図 3.12 に ΔAIC : マルチプルメカニズムモデルの AIC と cardinal モデルの AIC 間の

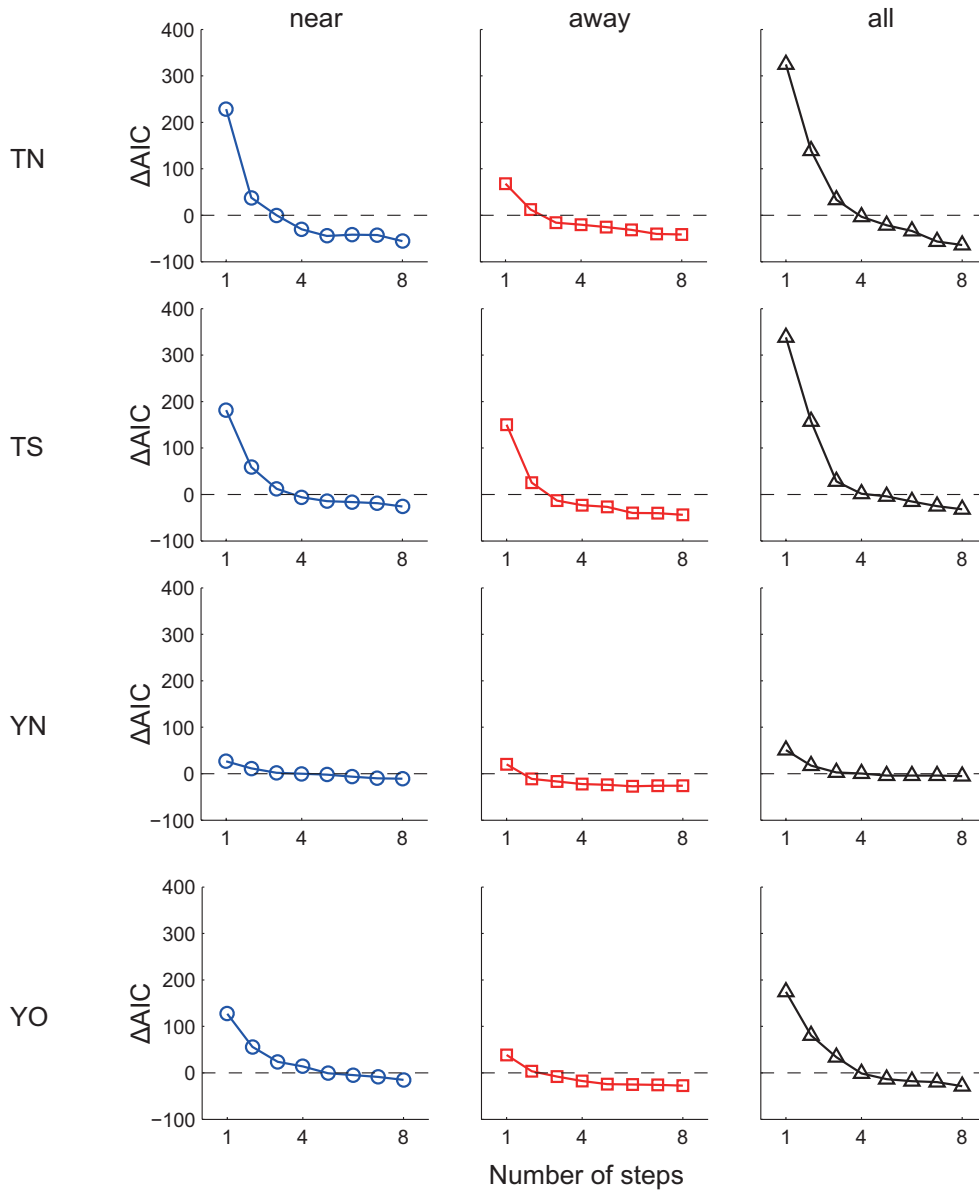


図 3.12 Cardinal モデルとマルチプルメカニズムモデル間の AIC の差 (ΔAIC)

横軸はステップワイズのステップ数、縦軸は ΔAIC を示す。最適化条件ごとに右から near、away、all の結果が並んでいる。各行に各被験者の結果が並んでいる。

差を示す。図の横軸はステップワイズ法のステップ数であり、ステップ数は基本的に選択されたメカニズムの数と一致する。 ΔAIC はステップ数が増えるごとに減少し、この傾向はステップ数 1 から 4 で AIC の減少が大きく、4 以降はほとんど変化しないように見える。これは今回の実験条件で使用した色信号が 4 方向だったためだと考えられる。加えて、cardinal モデルとステップ数 4 におけるマルチプルメカニズムモデルの間の AIC の差はほとんどゼロだった。これらの結果は 4 つのメカニズム (cardinal モデルも含む) が多数のメカニズムに対して今回の結果を説明するのに劣っていない可能性を示す。

図 3.13 に CI 実験の最適化されたモデルと実際の被験者の CP 間のユークリッド距離を

示す。AIC と同様に、ユークリッド距離もまたステップ数が 1 から 4 の間は大きく減少し、ステップ 4 以降はほとんど変化しなかった。基本的な CI 解析において、near 条件と away 条件の条件間で差が見られたため、実験条件ごとに最適化 (near、away)、そして両方をまとめて最適化 (all) の 3 つの最適化を実施した。CI の結果に関係なく、すべての実験条件のデータで最適化 (all) した場合の結果は、それぞれのデータで最適化した場合の結果と類似した。この傾向を検証するために、ユークリッド距離について反復測定二元配置分散分析 (要因 1: 最適化条件 (near, all; away, all)、要因 2: モデル (cardinal、multiple-step 4、multiple-step 8)) を SPSS Statistics 20 (IBM、Armonk、USA) を用いて行った。near 条件に対するシミュレーションでは有意な主効果と有意な交互作用は見られなかった。away 条件に対するシミュレーションでは、モデルによる主効果 [$F(2, 6) = 7.218, p = 0.025$] が見られた。しかし最適化条件と交互作用には主効果は見られなかった。従って、最適化条件間に有意な差はなく、つまり near 条件と away 条件の実験で介在するメカニズムは異ならないと考えられる。この考えはつぎの 3 つの理由から尤もらしい。

1. away 条件のデータだけで最適化するのは、信号色を検出するのに単一のメカニズムだけが効果的になる可能性があり好ましくない。
2. 全条件による最適化は他の実験条件ごとに対して多くの最適化が必要だという数学的な弱点があるにも関わらず同程度のパフォーマンスを持っている。
3. Giesel et al.[58] は等輝度平面上での様々な信号色に対するノイズマスキングによる閾値上昇は共通のモデルで説明できることを示した。

モデル間のパフォーマンスを比較するために、多重比較 (ボンフェローニ法) による事後検定を all 条件に対して行った。all 条件は最適化条件のなかでより実験結果を一般的に説明すると考えられるため事後検定を行った。多重比較の結果、モデル間に有意差はなかった。従って、今回の実験結果を説明するのにマルチプルメカニズムモデルが cardinal モデルよりも適していると結論づける事はできなかった。

Hansen & Gegenfurtner[56] は複数の広帯域メカニズムにより構成されたモデルが彼らの色弁別実験の結果を説明できることを示した。一方、彼らの実験結果を cardinal モデルや狭帯域なマルチプルメカニズムモデルでは説明することはできなかった。本章のモデル解析においても、広帯域と狭帯域のどちらが CI 実験の結果をよりよく説明できるかどうか、広帯域メカニズムだけ、あるいは狭帯域メカニズムだけで最適化したモデルのパフォーマンスを比較することで検証できる。シミュレーションによれば広帯域メカニズムで最適化したモデルのユークリッド距離は狭帯域メカニズムで最適化した場合よりも小さかった。広帯域メカニズムの方が多色ノイズからの検出に有利だという点において、本章の結果と Hansen & Gegenfurtner[56] の主張は一致する。

図 3.14 に各被験者のマルチプルメカニズムモデルにより推定されたメカニズム (all 条件、4 ステップ目) と cardinal モデルによる最適化結果を示す。推定されたモデルの多くは non-cardinal 方向にチューンしたメカニズムを含んでいた。しかしながら、前述した通

り、cardinal モデルもまた実際の被験者の結果をマルチプルメカニズムモデルと同程度のパフォーマンスで説明できた。もし、今回の結果を説明するのに cardinal 軸以外のメカニズムが効果的だった場合、複数のメカニズムを候補に持つマルチプルメカニズムモデルの方が AIC、あるいはユークリッド距離が小さくなると考えられる。この結果は4つのメカニズムのピーク方向がそれほど重要でない事を示唆する。従って、4つのメカニズムのバランスが CI や CP に見られた被験者間の違いを補っているのかもしれない。

しかしながら、実際の被験者とモデルの CP 間には少なくともユークリッド距離で 0.2 の差が残っていた。図 3.6 と図 3.7 に示した CP の強度と合わせて考えれば、この距離は小さいとは言えない。これらの距離の残差は本研究で採用したモデルが被験者応答を完全に再現したわけではないことを示唆する。

色覚メカニズムによる CI データの解析結果をまとめると、少なくとも今回の実験タスク: 色コントラスト判断の結果を説明することに関しては、4つのメカニズム (おそらく cardinal) はそれ以上のメカニズム数をもったモデルと同程度のパフォーマンスを持つ。

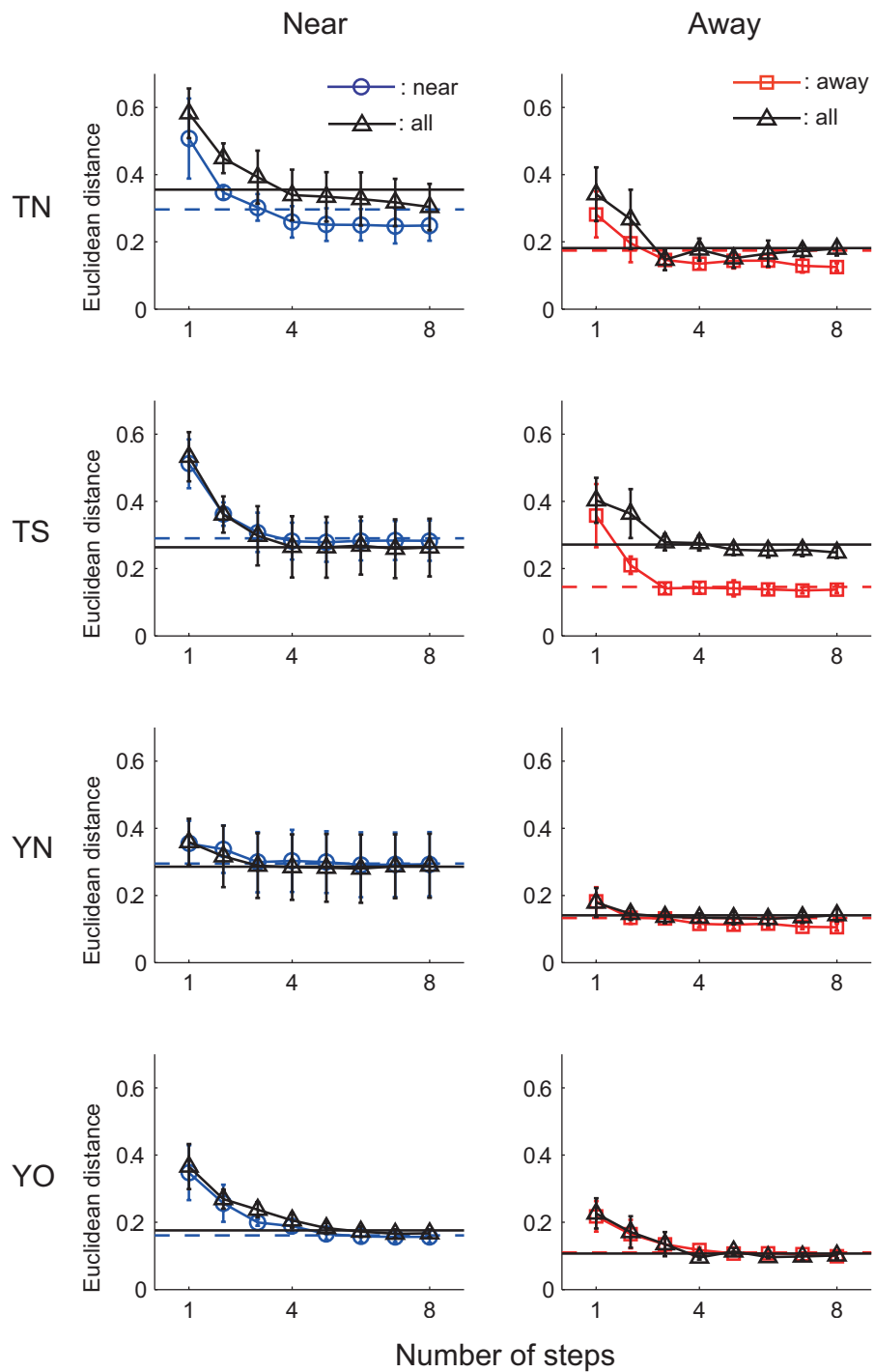


図 3.13 実際の被験者と最適化されたモデル間の CP のユークリッド距離

横軸はステップワイズ法のステップ数を、実際の被験者と最適化されたモデル間の CP のユークリッド距離をそれぞれ示す。near 条件は左に、away 条件は右に並んでいる。グラフ上の水平線は cardinal モデルによるシミュレーション結果を示し、破線は near と away 各条件における CI データを最適化に使用した場合、実線は両方の CI データを最適化に用いた場合をそれぞれ示す。

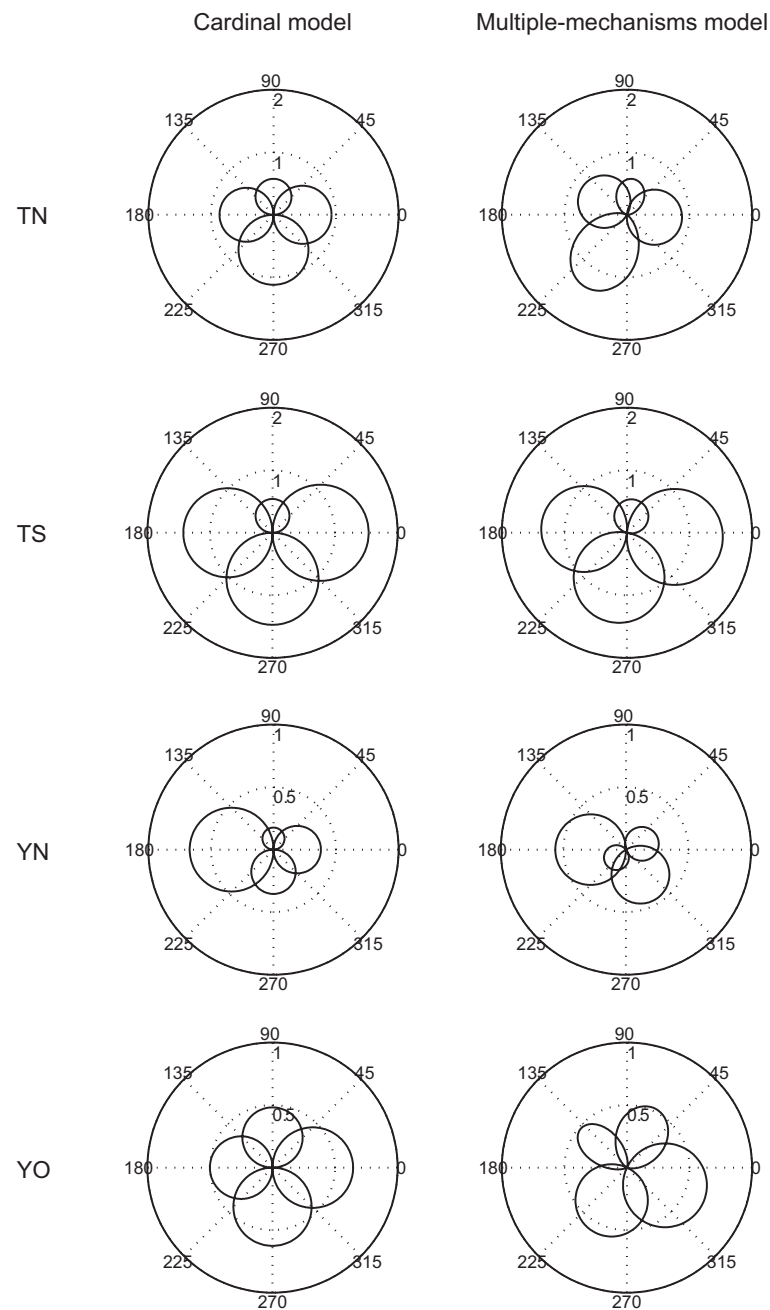


図 3.14 Cardinal モデルとマルチプルメカニズムモデル (ステップ 4) のメカニズム感度特性

Cardinal モデルの推定結果は左に、マルチプルメカニズムモデルの推定結果は右に配置してある。

3.4 考察

本章では多色ノイズ中における色コントラスト知覚について CI 法を適用して調査した。ここで、多色ノイズの分布として near 条件と away 条件の 2 つを使用した。結果として得られた CI には信号色が呈示されていた領域に強い色変調が見られた。また、背景領域においては信号領域と反対色方向への変調が信号領域と比較して弱いながら見られた。従って、実験における被験者応答は信号領域と背景領域の両方に依存していたことが分かった。興味深いことに、信号領域の色変調は必ずしも信号色と一致しなかった。この結果は CI が単純に信号色を再現したわけではなく、色コントラスト判断に関与した色覚メカニズムの特性を内在している可能性を示唆する。さらに、CI から計算された CP には被験者間、ノイズ条件間で差が見られた。

本章では基本的な CI 解析法だけではなく、ステップワイズ・ロジスティック回帰分析による刺激と被験者応答の解析も行った。モデルは複数の色方向に感度を持ったメカニズムから構成された。刺激に対する被験者応答を効果的に説明可能なメカニズムはステップワイズ法によって多くのメカニズム候補から選択され、各メカニズムの応答に対する重み係数はロジスティック回帰によって被験者応答とモデル応答が一致するように調整される。CI では特性に違いがみられた near 条件・away 条件の結果は、両方のデータを用いて最適化された共通モデルによって説明できることがわかった。ステップワイズ法のステップ数が増加するに従ってモデルのパフォーマンスは改善したが、その傾向はステップ数 4 までであり、それ以降はほとんど変化しなかった。従って、少なくとも今回の実験結果を説明するのに、4 つのメカニズムで構成されたモデルはそれ以上多くのメカニズムを含んだモデルに劣らないことがわかった。さらに、cardinal モデルのパフォーマンスでさえマルチブルメカニズムモデルと同等のパフォーマンスであった。この色覚メカニズムモデルに基づく再解析の結果から、色コントラスト判断における高次色覚メカニズムの証拠は見つからなかった。この結果はノイズマスキングの結果を説明するのに多数のメカニズムは必要ないと主張する先行研究 [52] と一致する。

Eskew によって基本的な CI 法では cardinal モデルと高次色覚メカニズムモデルを区別することができないことが指摘されていた [41]。本章では CI データを色覚メカニズムモデルに基づいてより詳細に解析した。本章のモデル解析は cardinal と non-cardinal メカニズムのどちらが CI に貢献したか区別可能である事がシミュレーションによって示された (図 3.11)。本章のアプローチは、色覚メカニズムの効果を基本的な CI 解析によって評価する方法と異なり、多色ノイズによるノイズマスキング実験によく利用されるモデル解析と類似していた。CI 法のような心理物理学的逆相関法は統計的な解析と組み合わせて利用すれば色覚メカニズムの特性を明らかにするのに有用かもしれない。

Hansen & Gegenfurtner[60] も高次色覚メカニズムの特性を明らかにするために、本章と同様に CI 法を多色テクスチャ刺激に対して適用した。しかしながら、背景領域の信号色

知覚への影響は本章と彼らの結果の間で異なった。Hansen & Gegenfurtner の CI は信号領域に相当する小さい領域にだけ色変調が見られた。一方、本章での CI は信号領域と背景領域の両方で色変調が見られた。2つの研究間の手法における主な違いはタスクと信号色が呈示されていた位置である。タスクに関して、Hansen & Gegenfurtner は呈示刺激に信号色が含まれるかどうか Yes/No タスクで調査した。一方、本章では背景色に対して2つの信号色のどちらがより高コントラストに見えたか 2AFC によって調査した。これら2つのタスクは色覚の異なる機能を使用していると考えられる。Hansen & Gegenfurtner の実験において、セッション中は信号色が固定されていたため、被験者は特定の信号色を検出するのに集中したと考えられる。対照的に、本章ではセッション中に様々な色相に対する色コントラスト判断が必要だったため、同時コントラストによる背景の強調や double-opponent 受容野 [71] の影響を強調した可能性がある。本章のタスクにおいて、被験者の判断基準の違いは最小化されていたはずである。従って、同じ刺激を使ったとしても、タスクの違いによって導出される CI は異なるかもしれない。

信号色の位置に関して言えば、本章の信号は周辺視野に呈示されたが、Hansen & Gegenfurtner[60] の場合は中心窩に呈示された。中心窩と周辺視では色覚特性が異なる [53, 72, 73] ため、視野の違いによってノイズマスキングの影響が異なった可能性がある。しかしながら、Newton & Eskew[53] のマスキング実験によれば、周辺視における赤・緑メカニズムの検出特性は中心窩とほとんど変わらない事が示されている。本章で使用したノイズテクスチャの視野に対する影響が先行研究と類似するか直接調査する必要があるが、彼らの結果はノイズマスキングの影響の違いが視野の違いから生じたという可能性を支持しない。

先行研究においてマルチプルメカニズムメカニズムが多色刺激を用いた心理物理実験に貢献することが示唆されている。例えば、Li & Lennie[47] は被験者が多色テクスチャを色分布の違いに基づいて領域分割 (segmentation) するときの色覚メカニズムについて調査した。結果として、彼らの実験結果を説明するモデルは cardinal 軸に加えて non-cardinal 方向に感度ピークを持ったメカニズムから構成された。従って、多色テクスチャの領域分けには高次色覚メカニズムが関係している事が示唆されている。多色テクスチャを使用した他の先行研究も高次色覚メカニズムが関係していることを示唆する [51, 56, 57, 58] が、いくつかの研究は反対色メカニズムが検出・弁別タスクで大きな影響を持つこと示唆する [48, 50]。本章の結果は cardinal モデルが色コントラスト判断のパフォーマンスを説明するのに十分である事を示唆し、高次色覚メカニズムが関与する証拠は見つからなかった。多色テクスチャに対する色知覚の結果を説明するのに必要なメカニズムの数の推定結果の違いの原因を同定することは出来ないが、実験刺激や実験タスクの違いが原因である可能性がある。例えば、信号色が4つであることは cardinal モデルがマルチプルメカニズムよりも好ましいという結果の原因になったかもしれない。しかしながら、本章で提案した色覚メカニズムに基づく解析は、信号色が non-cardinal 方向だけであるにも関わらず、cardinal モデルとマルチプルメカニズムモデルの両方とも実験結果をうまく説明できた。

従って、信号色の数はモデルに必要なメカニズム数の違いを引き起こす原因ではないと考えられる。今回の実験タスク: 弁別課題は色覚の基本的な機能の一つであり、視覚系の低次な処理段階でも遂行可能である。従って、RGC や LGN で見られる cardinal 軸の影響が大きかった可能性が考えられる。

永田は視覚探索パラダイムを用いて色弁別閾値を測定し、cardinal 軸だけでなく non-cardinal 方向に選択的な閾値上昇が見られる事を報告した [74]。先行研究では被験者が視覚探索中に特定の色に選択的に注意を向けることができる条件と、それが困難な場合を比較し、注意を向ける事ができる実験条件の方が non-cardinal 方向の感度が高く、その影響が強い事を示した。これらの結果はタスクに対する注意によって感度が変調される高次色覚メカニズムが存在する可能性を示唆する。本章では実験刺激が複数の色相を含んだ多色テクスチャであり、被験者が検出するべき信号色も同一セッション内で複数の色相が含まれていた。従って、本章の実験条件では被験者は特定の色相に対して注意を向けることは困難だったと考えられる。cardinal 軸の感度は non-cardinal 方向の感度よりも高い事が指摘されており [75]、本章の実験条件のような視覚的注意の影響が小さい場合、より感度が高い cardinal 軸が実験結果に大きな影響を与えた可能性は十分考えられる。また、視覚的注意が高次色覚メカニズムの特性に影響するならば、検出するべき信号色を事前に呈示するなどして被験者の視覚的注意を制御するようにすれば、CI 法によって視覚的注意による色覚特性の影響を調査できるかもしれない。

本章の CI において、CP の特性に同一被験者においてもノイズ条件: near 条件と away 条件で差が見られた。しかしながら、ノイズ条件による結果の違いは共通のモデルによって、それぞれの条件ごとに最適化した場合のパフォーマンスを悪化させることなく十分説明可能だった。それでは、ノイズ条件による CP の違いは何が原因だろうか。可能性のある要因の一つはノイズ条件によってメカニズムのバランスが異なったということである。away 条件に位置する色分布を持つ多色ノイズは特定の色相のメカニズムだけマスクし、他のメカニズムには影響がほとんどなかったと考えられる。従って、マスクされた特定の色相のメカニズムの感度だけがノイズの影響を受けたと考えられる。対照的に、near 条件に位置する色分布を持つ多色ノイズはほぼ全てのメカニズムをマスクしたであろう。従って、メカニズム間の感度バランスは同じ信号色であってもノイズ条件間で異なっていたと考えられる。共通のメカニズムが処理に関わっていたとしても、ノイズによるメカニズム間の感度バランスの違いが CP の違いとして現れたのかもしれない。ちなみに、共通のモデルが near 条件と away 条件に関係するという結果は Giesel et al.[58] と一致する。

本章の最適化したモデルによる CI 実験のシミュレーションは完全に被験者応答を再現できたわけではない。等輝度平面上で被験者とモデルの CP の間にはユークリッド距離で約 0.2 の差があった。この残差は CI の色変調の強さと比較すると十分大きいと考えられる。従って、先行研究でも使用されてきており、本章でも使用した色覚メカニズムモデルは色コントラスト知覚を説明するには不十分なのかもしれない。色情報の非線形処理や注意による色感度調整を含む、より複雑な色覚モデルが必要とされるかもしれないが、今回

の実験のみではその問題に明確に答える事は難しく、今後の課題といえよう。

3.5 本章の総括

本章では順応色付近・外での多色テクスチャにおける色コントラスト知覚特性を CI 法を適用して調査した。CI における色変調の方向は信号色によって異なり、これは色覚メカニズムが CI の色変調に影響を与えた可能性を示唆する。さらに、CI の色変調はノイズ条件、被験者間で異なった。本章では CI データを色覚メカニズムモデルに基づいて解析し、ステップワイズ・ロジスティック回帰分析によって被験者応答を説明できるようにメカニズムの数やその感度を最適化した。結果として、今回の実験を説明するには cardinal モデルを含む 4 つのメカニズムで構成されたモデルが十分であることが分かった。これらの結果は基本的な CI 解析で明らかにすることは困難だったが、本章では統計的な手法と組み合わせることで CI 法により得られたデータから色覚メカニズムパラメータの推定を可能にした。

第 4 章

不完全色順応における色弁別と色の見えメカニズムの均衡点の分離

4.1 はじめに

第 3 章では色情報表現に関して色相の観点から検討した。第 4 章ではもう一つの色の属性である彩度の観点から色情報表現を検討する。彩度の決定には原点となる無彩色点が必要であり、本章では無彩色点に着目し彩度表現を調査する。

視覚系における色情報表現は色情報処理が進むにつれて変化し、処理段階によって異なる心理物理学的タスクと関連づけられる。例えば、色弁別のような色の違いを区別することは低次の処理段階でも可能だが、明らかに弁別可能な色差に対する差の判断: 閾上色差の比較は色弁別よりも高次の処理段階で遂行され则认为られる。色弁別と色の見えの両方を一つのメカニズムが制御すると仮定した場合、弁別閾値の逆数の累積が閾上色差の色差知覚と比例する。

本章では共通の応答関数が色弁別と閾上色差を制御しているかどうか調査した。本章の作業仮説: 「もし共通のメカニズムが色弁別と閾上色差を制御しているならば、2 つの結果はただ一つの応答関数によって説明されるべきである」を検証する。いくつかの先行研究において色弁別と色の見えが共通のメカニズムによって説明できるかどうか心理物理学的データをモデルで解析することで検証されてきた [29, 30, 76]。Hillis & Brainard[29, 30] は共通の応答関数モデルが、色順応とコントラスト順応による色弁別と色の見え変化を説明できると報告している。また、Devinck & Knoblauch[40] は水彩効果における色弁別と色の見えが同一の信号検出理論に基づいたモデルで説明できる事を示した。彼らの結果は閾値付近と閾上の色知覚が共通のメカニズムで説明できることを示唆する。

無彩色点は色の見えの基準点である。また、無彩色点は相反する色相メカニズムの均衡点、色信号がゼロあるいは彩度が均衡する点として考える事ができる。無彩色点はしばしば強制選択法 [77] や調整法により無彩色点を決定する消去法 [78] によって定義される。ここで弁別実験における無彩色点に対して疑問が生じる: 無彩色点における弁別は何か特

別な特性を持つだろうか？ 先行研究によって弁別感度が最大になる色度は無彩色点と一致することが示唆されている。これは色信号の入力が小さいほど色弁別感度が高くなることを暗示し、Weber の法則 [24] と類似する。従って、もし色の見えと色弁別がメカニズムを共有するならば、色弁別感度が最大となる色度は無彩色に見えるはずである。このように、色覚の均衡点は色の見えにおいては無彩色点であり、色弁別においては弁別感度が最適化された点となる。

色の見えと色弁別は両方とも照明環境や周辺の色などのコンテキストの影響を受ける。このコンテキストの変化による感度変化は順応と呼ばれる。順応によって視覚系は様々な環境における色の見えや色弁別を最適化している。色弁別特性における先行研究は弁別感度が最大となる色度は被験者が順応した色度であることを報告している [25, 26, 27, 28]。

しかしながら、色の見えを調査した先行研究において、順応色が高彩度すぎる場合に不完全色順応が生じ、順応領域が無彩色にならないことが報告されている [18, 19]。一方、色空間のあらゆる色度を順応色として色弁別特性が測定されているが、色弁別感度が最大となるのは順応色であり、これは弁別に関係するメカニズムが完全順応していることを暗示する。不完全色順応における弁別と見えの特性を考慮すると、Hillis & Brainard[29] の提案は弁別と見えの間で異なる特性を発見した先行研究 (不完全色順応におけるコントラスト順応 [31]、順応の時間特性 [32]) と不一致が生じる。しかしながら、不完全色順応下における色の見えと色弁別を比較した研究はほとんどない。従って、不完全色順応下で色弁別と色の見えが共通のメカニズムによってその特性が説明できるかどうかは未解明である。

本章では、色弁別と閾上色差を完全色順応・不完全色順応状態で測定した。さらに色弁別と閾上色差から感度関数をそれぞれ導出し比較した。もし2つのタスクに共通のメカニズムが介在するならば、Fechner の法則 [24] が示唆するように、類似した感度関数が2つのタスクによって得られたデータから導出されるはずである。本章の結果は均衡点が異なる感度関数が導出されたことから、これら2つのタスクの間には異なる色情報表現が介在していることを示唆する。

4.2 手法

4.2.1 原理

最初に、色の見えにおける無彩色点と弁別感度最大となる点が共通であるモデルを仮定する。この仮説モデルを棄却することで色の見えと色弁別の間に異なる色情報表現が存在することを実証する。以下にモデルの詳細を記述する。

まず最初に、無彩色点は cone-opponent 段階 [25, 26] の2つの色軸 ($L-M$, $S-(L+M)$) によって定義される。等輝度平面上における無彩色点は $L-M$ と $S-(L+M)$ の出力が均衡した点だと仮定する。ここで、 L 、 M 、 S はそれぞれ長波長、中波長、短波長に感度を持

つ錐体細胞の応答を示す。これらの軸は半波整流された cone-opponent メカニズムの出力から構成されていることが知られている [36, 79]。色の見えメカニズムについて言えば、L-M 軸は赤-緑方向と大まかに一致し、L-M の正・負方向はそれぞれ赤・緑感度メカニズムの半波整流された出力に相当する。図 4.1(a) に L-M 軸の弁別特性の例を示す。この曲線は様々なテスト刺激における閾値を測定したものである。この曲線は threshold versus intensity (tvi) 曲線と呼ばれる。ここでは図 4.1(a) に示された tvi 曲線は赤メカニズムと緑メカニズムの組み合わせだと仮定する。色弁別のパフォーマンスにおいて、無彩色点は tvi 曲線の谷、つまり赤メカニズムと緑メカニズムの均衡点となる。この傾向は Weber の法則と定性的に類似し、基準となる信号が小さいほど閾値の上昇は小さくなる。例えば、もし基準信号が L-M 軸正方向に増加すれば赤メカニズムにより赤色の知覚が生じ、図 4.1(a) の黒線で示したように弁別閾値が上昇する。同様に、基準信号が L-M 軸負方向に増加すれば緑メカニズムにより緑色の知覚が生じ、弁別閾値が上昇する。従って、弁別閾値が最小になる色は 2 つのメカニズムの均衡点であり、赤知覚も緑知覚も生じない点となる。図 4.1(b) に L-M 軸における色弁別感度曲線の例を示す。感度関数は図 4.1(a) に示した tvi 曲線の逆数を計算することで決定される。従って、弁別感度が最大になる色度は赤・緑メカニズムの均衡点と一致し、均衡点から離れるほど感度は減少する。次に、知覚的な応答関数を Fechner の法則 [24] に基づいて導出できる。図 4.1(c) に L-M 軸における知覚的な応答関数の例を示す。応答関数の正方向の部分は赤メカニズムの弁別感度曲線の値を (+L-M) 方向に累積することで導出できる。もう一方の、応答関数の負方向の部分は同様の処理を緑メカニズムを負方向として (-L+M) 方向に累積することで導出できる。最終的に、赤・緑の応答関数を結合することで L-M 軸における応答関数を導出できる。この色の見え-色弁別モデルにおいて、無彩色点は弁別感度最大となっているので関数の傾きが最大となる点である。もし異なるメカニズムが 2 つのタスクに介在するならば、弁別感度最大と無彩色点が一致する必要はない。

この問題に対して、本章では 2 つの実験を行った: 色弁別と閾上色差を異なる順応条件で実施した。実験装置と実験手続きは次節から記述するように統一された。

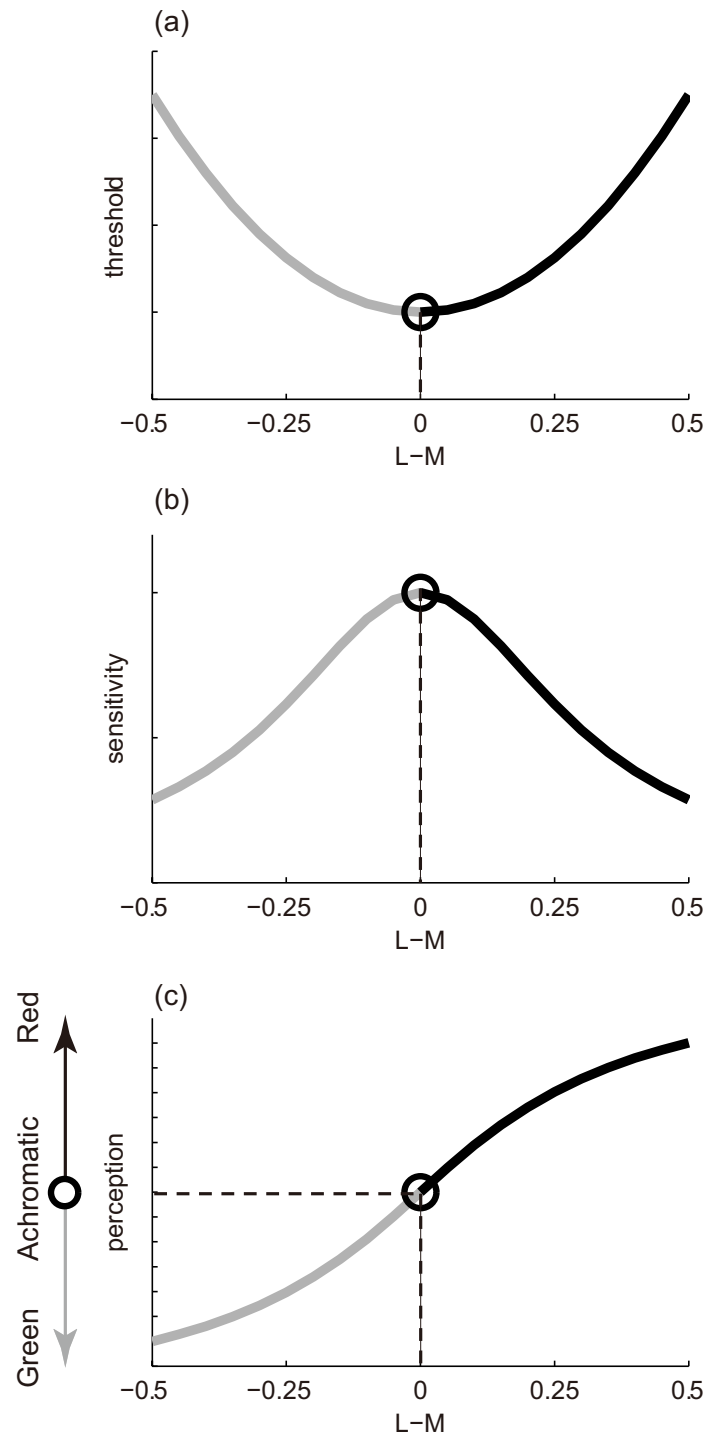


図 4.1 色弁別特性と色差特性間の均衡点の関係の概念図

(a) と (b)、(c) の横軸は DKL 色空間の L-M 軸を示す。(a) は L-M 軸上の仮想的な弁別特性を示す。縦軸は弁別閾値を示す。丸は順応色を示す。黒と灰色の実線は半波整流された赤メカニズムと緑メカニズムの特性を示す。(b) は (a) の逆数から導出された弁別感度曲線を示す。(c) は L-M 軸上の刺激強度に対する仮想的な応答関数を示す。縦軸は色の見えを示す。縦軸は無彩色点を境に正方向は赤、負方向は緑に知覚される。黒と灰色は赤メカニズムと緑メカニズムの応答特性を示す。これら 2 つの異なるタスクに対する特性は Fechner の法則によって関連づけることができる。

4.2.2 装置

呈示刺激は CRT ディスプレイ FlexScan T766 (EIZO、石川、日本) に呈示された。CRT のリフレッシュレートは 120Hz、解像度は 1024×768 pixel に設定した。CRT ディスプレイは分光放射輝度計 SR-3AR (トプコン、東京、日本) と色彩輝度計 Color CAL II (Cambridge Research Systems (CRS)、Rochester、UK) を使用して較正を行った。刺激呈示装置 Bits++ (CRS、Rochester、UK) を通して刺激を呈示することで、RGB それぞれについて 14bit の階調を使用することができた。RGB それぞれの色度と輝度 (x, y, Y) は、R: (0.625, 0.344, 25.1), G: (0.277, 0.611, 73.2), B: (0.150, 0.0646, 9.56) だった。実験はすべて PC によって制御されるが、制御プログラムは MATLAB (MathWorks、Natick、USA) と Psychtoolbox[68, 69] を用いて作成した。

4.2.3 色空間

刺激の色度は Smith & Pokorny の錐体分光感度 [1] に基づいた DKL 色空間 [34, 35] の等輝度平面上で定義された。DKL 色空間の原点は標準光源 D_{65} の色度で 20 cd/m^2 とした。DKL 色空間は 3 つの cardinal 軸: 輝度、L–M、S–(L+M) で構成される。DKL 色空間の軸はディスプレイの色域に基づいて最大コントラストが +1 あるいは -1 になるように正規化された。正規化係数は各軸の正・負方向のより小さいコントラストに基づいて決定された。実際には、本章で実験に使用した L–M 軸は +1.0 より高いコントラストを呈示可能だった。

4.2.4 呈示刺激

呈示刺激は図 4.2 に示すように、黒枠に囲まれた 3 つの正方形 ($2 \text{ deg} \times 2 \text{ deg}$) で構成された。黒い十字の固視点がディスプレイの中央に呈示された。3 つの正方形の横方向の位置は、1 つはディスプレイの中央に呈示され、他の 2 つはディスプレイの中央から右か左に 1.5 deg 離れた位置に呈示された。ディスプレイの中央に呈示された正方形は弁別実験と閾上色差実験において参照刺激として使用された。縦方向の位置は正方形の中心がディスプレイの中央から 1.5 deg 離れた位置に呈示された。試行ごとに参照刺激が固視点の上下どちらに呈示されるかランダムに決定された。

刺激の色度は L–M 軸上から選択された。順応色となる背景の色度は $\text{Gray}[(L - M, S) = (0, 0), (x, y) = (0.312, 0.329) : \text{標準光源 } D_{65} \text{ の色度}]$ 、あるいは $\text{Red}[(L - M, S) = (0.7, 0), (x, y) = (0.364, 0.304)]$ だった。また両方の背景色度の輝度は 20 cd/m^2 であった。4.2.7 節で説明する予備実験によって、Gray と Red の色度がそれぞれ「完全色順応」と「不完全色順応」となることが確認された。完全色順応かどうかの確認は心理物理実験による知覚的無彩色点の測定と、初期順応と実験セッションの後に背景が無彩色に見える

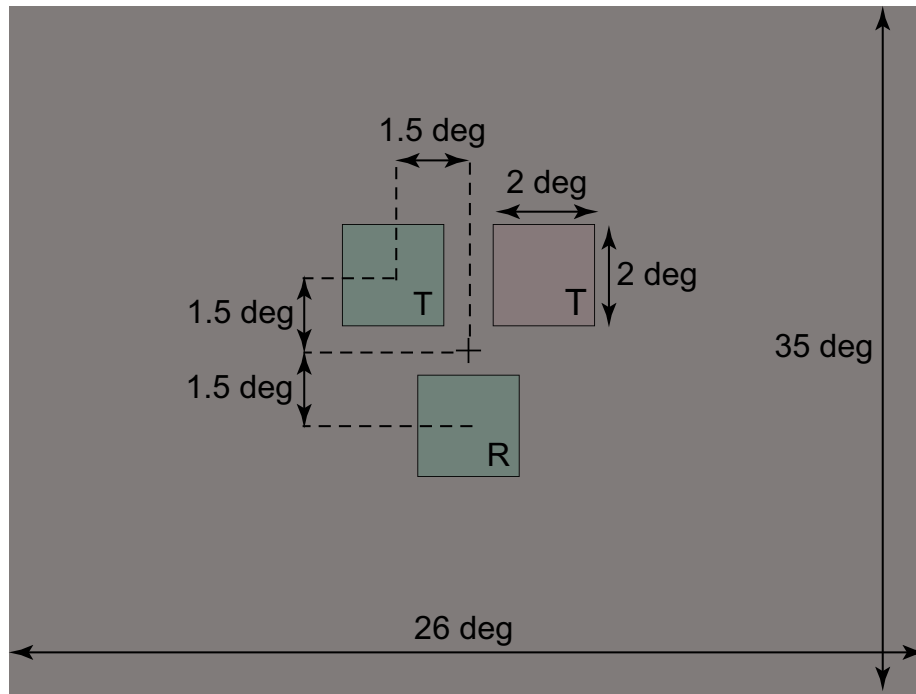


図 4.2 呈示刺激の空間構成 (Gray 条件)

かどうか口頭応答で確認した。参照刺激とテスト刺激の色度は実験ごとに記述する。

4.2.5 実験手続き

実験刺激の呈示方法は全ての実験で共通であり、タスクと色度だけが実験間で異なった。被験者は実験セッションの最初に 60 秒間背景色 (Gray か Red) に順応した。背景色に従って、実験条件を Gray 条件、Red 条件とする。試行において、呈示刺激は 1 秒間呈示された。刺激呈示中、刺激のコントラストは最初の 125ms でコサイン波状に上昇し、750ms 間最大コントラスト、その後 125ms でコサイン波状に減少した。被験者は各実験ごとに設定されたタスクを遂行した。1 試行が終わるごとに、被験者の順応状態を維持するために 5 秒間の順応時間が挟まれた。固視点は実験セッションを通して呈示され続けた。Gray 条件と Red 条件は異なる実験セッションで実施された。

4.2.6 被験者

9 名の被験者が予備実験である無彩色点計測実験に参加した。9 名中、5 名の被験者 (HN、KT、RK、TS、YN) が実験 1 と実験 2 に参加した。すべての被験者はパネル D-15 テストと、石原式色覚異常検査表により正常色覚であることが確認された。また、すべての被験者は正常、あるいは矯正により正常な視力を有していた。著者 (TS) を除いて全ての被験者は実験目的について知らなかった。

なお、本実験は国立大学法人豊橋技術科学大学安全衛生委員会「ヒトを対象とする研

究」審査会の承認を受けて行われた。

4.2.7 予備実験: 無彩色点測定実験

予備実験において各被験者の知覚的な無彩色点を測定することで、Gray 条件と Red 条件が完全色順応と不完全色順応となっているかどうか確認した。3 つの正方形は同一色度であり、その色度は L-M 軸上から選択された。被験者は正方形が赤と緑のどちらに見えるかマウスクリックを通して回答した。実験手続きとして階段法 [37] を使用し、正方形の色度変化は 1up-1down とした。例えば、被験者応答が「赤」だった場合、次の試行の色度は赤という知覚を減少させるために L-M 軸上のコントラストが負の方向に変化した。1 セッション中には 2 つの上昇系列 (開始点がおおよそ赤色) と下降系列 (開始点がおおよそ緑色) の階段があった。階段法の終了条件は刺激強度変化の折り返し 6 回とした。各順応条件はそれぞれ 1 セッション実施された。得られた結果に対して心理物理測定関数を最尤法によって当てはめ、赤の応答確率が 50% となる色度を無彩色点とした。最尤法には Palamedes toolbox (<http://www.palamedestoolbox.org/>) を使用した。

図 4.3(a) に 2 つの順応条件に対するすべての被験者の無彩色点を示す。Gray 条件において、無彩色点は順応色とほぼ同じであり、個人差は小さかった。一方、Red 条件において、無彩色点は順応色と異なっており、無彩色点は順応色のコントラストよりも小さかった。図 4.3(b) に無彩色点の標準偏差を示す。無彩色点の標準偏差は Red 条件の方が Gray 条件よりも大きいことがわかる。これは Red 条件における無彩色に見える範囲が Gray 条件よりも広がったことを示唆する。この傾向は先行研究で報告されている色の見えが一定でほとんど変化しない領域である “hiatus” [80] に相当すると考えられる。加えて、被験者に初期順応と実験セッションの後に背景の色の見えを尋ねた。全ての被験者は Red 条件における背景が赤く見えたと答えた。これらの結果は Red 条件において不完全色順応が生じていたことを示す。Red 条件の個人差は Gray 条件の個人差よりも大きかったが、2 つの条件間の無彩色点には t 検定 (対応あり、両側検定) によって統計的に有意な差 ($p < 1.0 \times 10^{-5}$) があることが確認された。

4.3 実験 1: 色弁別

本実験では弁別感度が最大となる色度が順応色と一致するかどうか確認するために感度曲線 (以下、sensitivity versus intensity; svi 曲線とする) を測定した。

4.3.1 手法

実験 1 では svi 曲線を導出するためにいくつかの色コントラストにおける弁別感度を測定した。被験者には図 4.2 に示した 1 つの参照刺激と 2 つのテスト刺激から構成された刺激が呈示された。参照刺激の色度はペDESTALに相当し、順応色に特定の色コントラスト

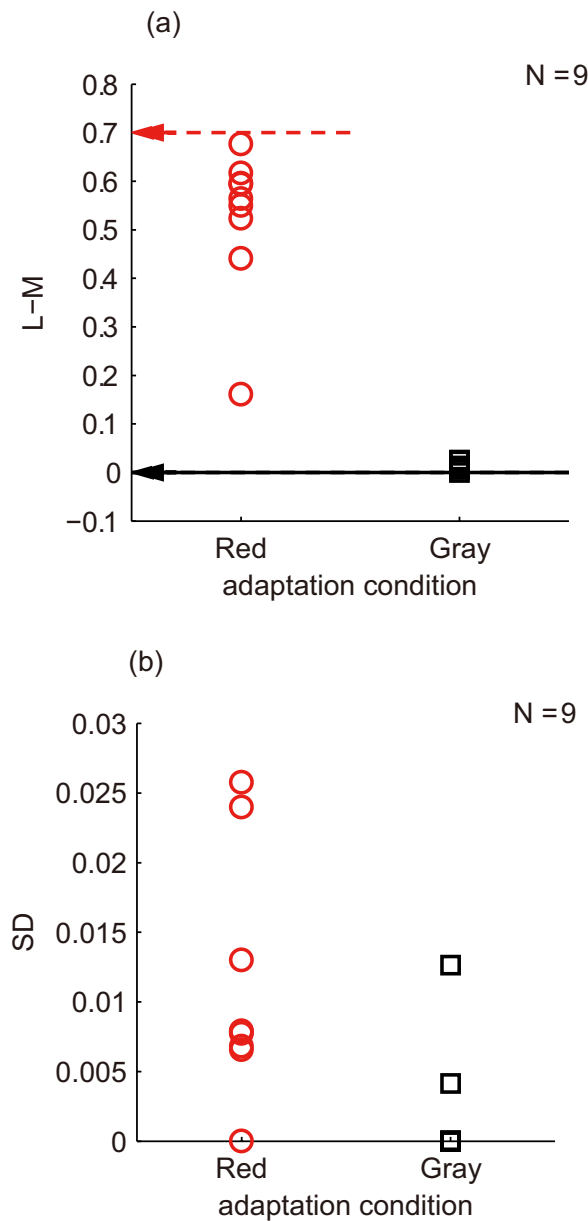


図 4.3 無彩色点実験結果

(a) 縦軸は被験者の“赤”応答が 50% になった色度を示す。丸と四角のプロット点は Red 条件と Gray 条件の結果をそれぞれ示す。水平方向の矢印は各条件の順応色を示す。(b) 図の見方は縦軸が 1000 回のブートストラップにより推定された無彩色点の標準偏差を示すこと以外 (a) と同様である。

を加える。本実験ではこの参照刺激の色度における弁別閾値を測定した。参照刺激の色度は、Gray 条件では -0.3 から 0.7 、Red 条件では -0.1 から 0.9 からそれぞれ選択された。2 つのテスト刺激のうち一つは参照刺激と同じ色度であり、もう一つのテスト刺激は参照刺激と異なる色度だった。被験者は参照刺激と異なるテスト刺激が右と左のどちらに呈示されていたかマウスクリックを通して応答した。各試行の応答に対して音によるフィードバックが与えられた。テスト刺激と参照刺激間の色差は被験者の応答に従って 1up-2down 階段法 [37] によって変化した。ターゲットとなるテスト刺激は参照刺激よりも正方向に

高コントラストな色差を持っていた。階段法の終了条件は刺激強度変化の繰り返し 6 回とした。各参照刺激における弁別閾値は各セッションの刺激強度変化の繰り返しの最後 4 回の平均から計算された。そして、弁別感度は閾値の逆数として計算された。各被験者の弁別感度の平均と標準誤差 (standard error of the mean; SEM) を得るために、実験セッションを被験者 TS は 9 セッション、他の 4 名の被験者は 6 セッション繰り返した。svi 曲線の感度最大となる色度を推定するために、弁別感度に対して次に示す関数を最小二乗法によって当てはめた。

$$f(x, A, \mu, \sigma, C) = AN(x, \mu, \sigma) + C \quad (4.1)$$

ここで、 x は参照刺激の色度、 A は振幅、 μ は関数のピークとなる色度、 σ は関数の感度幅をそれぞれ示す。 $N()$ はガウス関数 (正規分布) を示し次のように表される。

$$N(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.2)$$

実験 2 の結果との直接比較を可能にするために、本章では L-M 軸の正負方向で対称な感度関数を当てはめた。

4.3.2 結果と考察

図 4.4 に赤・緑方向の svi 曲線を示す。順応条件によって異なる色とシンボルで結果がプロットされている。エラーバーはセッション間の SEM を示す。被験者 KT を除いて、弁別感度最大となる色度は両方の順応条件で順応色付近であった。この結果は色弁別における均衡点が順応色であることを示し、弁別に関与するメカニズムが完全色順応状態だったことも示す。

図 4.5 に示すように、順応色と無彩色点のどちらが均衡点に近いかが明らかにするために、均衡点と順応色・無彩色点間の距離に対して並べ替え検定を行った。Gray 条件では 2 つの距離に統計的有意差はみられなかった。一方、Red 条件では、2 つの距離に統計的有意差が見られた (符号付き距離: $p < 0.01$; 絶対値距離: $p < 0.05$)。図 4.5 に示したように、均衡点と順応色間の距離は均衡点と無彩色点間の距離よりも小さい。これらの結果は色弁別メカニズムの均衡点が無彩色点ではなく順応色により近いことを示す。これらの結果は少なくとも 2 つの色情報表現が色弁別と色の見えそれぞれに存在することを示唆し、この傾向は不完全色順応状態で明らかになる。

本章の実験刺激の等輝度は測光的に決定されており被験者ごとに決定していない。輝度メカニズムの L 錐体と M 錐体の重み付けは被験者によって異なる [81] ため、弁別実験において色信号の他に輝度信号が弁別感度に影響する可能性がある。しかし、本実験では刺激のサイズが大きく、被験者の網膜上の錐体配置の違いやディスプレイの空間的な特性の差など影響があり完全に均一な等輝度を設定する事はほとんど不可能である。ただ

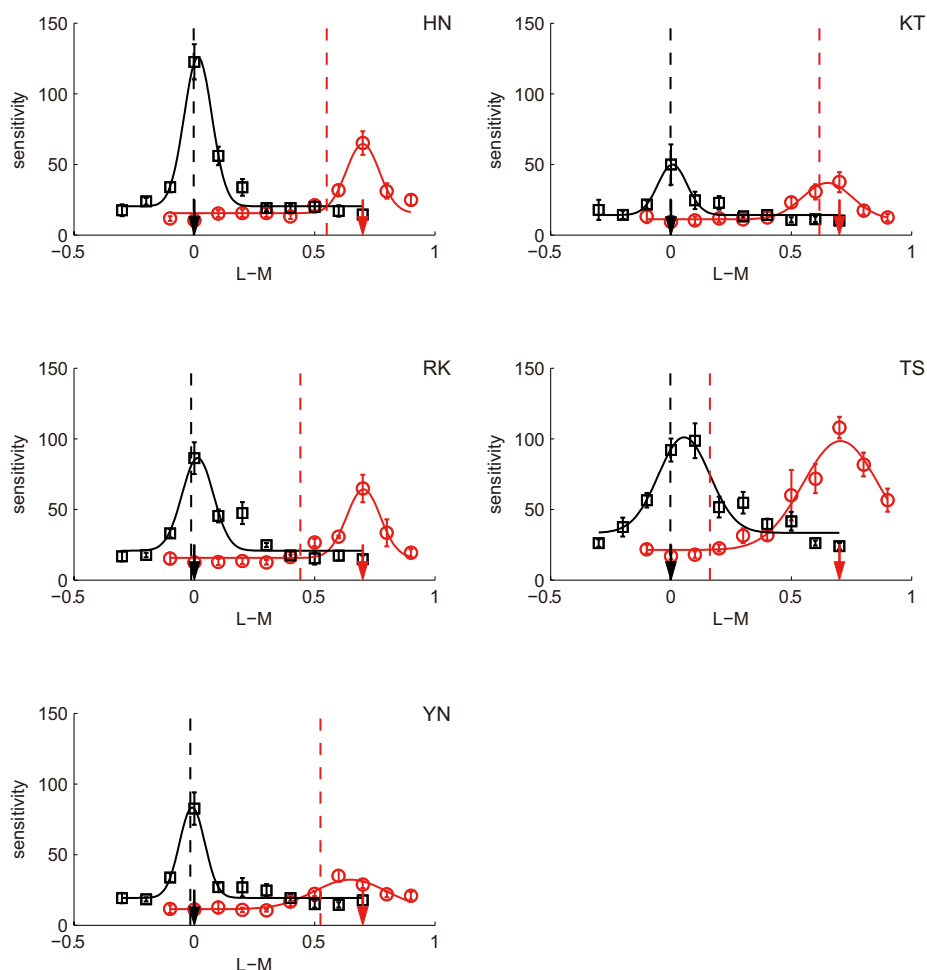


図 4.4 svi 曲線

横軸は参照刺激の色度、縦軸は弁別感度をそれぞれ示す。パネルごとに異なる被験者の結果が示されている。Red 条件の結果は丸で、Gray 条件は四角でそれぞれプロットされている。実線は最小二乗法によって当てはめられたガウス関数を示す。グラフ上の縦の破線は各実験条件における被験者の知覚的な無彩色点を示す。矢印は各実験条件の順応色を示す。エラーバーは \pm SEM を示す。

し、本章では実験刺激のコントラストをコサイン波状で時間的に滑らかに変化させ輝度信号の影響を抑制した。加えて、本章の弁別実験の最も重要な結果である「弁別感度が背景色において最大になる」という結果は、輝度の影響を時空間的に低周波数な刺激を使用し抑制した研究 [82] や、個人の等輝度を測定して実験を行った研究 [31, 83] と一致する。従って、本章の弁別実験結果も基本的には色メカニズムによって制御されていたと考えられる。

4.4 実験 2: 閾上色差

本実験では L-M 軸上の色度の知覚的な差の関数となる閾上色差を測定した。知覚的な色差は MLDS 法 [38, 84] によって推定された。MLDS 法において、被験者は 2 つの刺激

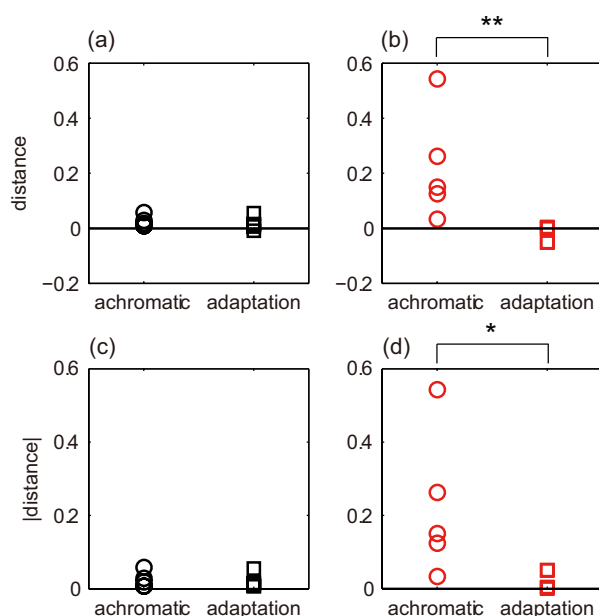


図 4.5 閾値最小点と無彩色点 (○)・順応色間 (□) の距離

(a) と (c) は Gray 条件、(b) と (d) は Red 条件の結果をそれぞれ示す。(a) と (b) は符号付き距離、(c) と (d) は絶対距離を示す。並べ替え検定において統計的有意差 (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$) が Red 条件において確認された。

対 (例えば、4 刺激 ((a, b) vs. (c, d)) か、3 刺激 ((a, b) vs. (b, c))) が呈示され、どちらの刺激対がより差が大きいか判断する。様々な刺激対の組み合わせにおける被験者判断に基づいて、MLDS 法は被験者の応答を説明する最尤値を推定する。

4.4.1 手法

刺激は図 4.2 に示すように 3 つの正方形で構成され、そのうち 2 つはテスト刺激で、1 つは参照刺激だった。色度の組み合わせは 12 色の候補から 3 つの色度 (a, b, c) の組み合わせが選択された。候補の色度は Gray 条件では -0.35 から 0.75 、Red 条件では -0.15 から 0.95 であった。色度 b は常に参照刺激として使用され、ほかの色度はテスト刺激として使用された。残りの a と c の色度のどちらが右、あるいは左に呈示されるかは試行ごとにランダムに決定された。3 色の組み合わせは MLDS 法のアルゴリズムによって決定された。実験セッションには 152 試行あり、全組み合わせ 220 試行 (${}_{12}C_3$) からそれぞれの色差が 0.4 ($||a - b| - |b - c|| < 0.4$) より大きい試行は除かれた。3 色の組み合わせはランダムに呈示された。被験者は 2 つの色の組み合わせ (a vs b , b vs. c) のどちらがより大きな色差だったか判断した。被験者は MLDS 法による実験を順応条件ごとに 4 セッション繰り返した。12 色の候補に対する知覚的な色差を MLDS 法により推定した。MLDS 法の実験条件生成と解析には Palamedes toolbox (<http://www.palamedestoolbox.org/>) のパッケージを使用した。推定された閾上色差特性に対して single-peak モデルと two-peak モデルに

よる解析を行った。single-peak モデルは弁別感度に対して当てはめた関数の積分であり、原理で説明した弁別と見えが微分・積分の関係にある。しかし、後述するが閾上色差特性は複数のピークを持つことから single-peak モデルでは結果を説明するのに不十分である可能性があった。そこで、複数のピークを持つモデルである two-peak モデルによる解析を行った。これら2つのモデルによる解析と解析結果を次の節から記述する。

4.4.2 Single-peak モデルによる閾上色差特性の解析

手法

閾上色差実験後、MLDS 法によって推定された閾上色差特性に対して single-peak モデルを最小二乗法によって当てはめた。single-peak モデルは弁別感度特性に当てはめた関数の積分であり、次式で表される。

$$F(x, A, \mu, \sigma, C) = \int f(x, A, \mu, \sigma, C) = A \int N(x, \mu, \sigma) + Cx \quad (4.3)$$

ここで、 x は L-M 軸上の色度、 A は累積ガウス関数の最大値、 μ は関数の変曲点、 σ は関数の傾き、 C は線形関数の傾きをそれぞれ示す。式 4.3 において傾きが最大となる点は変曲点である μ となる。このモデルは感度ピークを1つ持つため single-peak モデルとする。

結果と考察

図 4.6 に閾上色差特性に対して single-peak モデルを当てはめた結果を示す。両方の順応条件において、被験者 TS を除き、傾きが最大となる色度点は各被験者の無彩色点付近(図 4.6 の縦の破線)に位置するように見える。図 4.7 に示したように、single-peak モデルによって推定された均衡点が無彩色点と順応色のどちらにより近い解析した。Gray 条件において、並べ替え検定によって「均衡点と無彩色点の距離」と「均衡点と順応色の距離」の間に有意な差が見られないことがわかった。一方、Red 条件において、2群間に有意な差 ($p < 0.01$) があることが並べ替え検定によって示された。図 4.7 に示した通り、被験者 TS を除いて、均衡点と無彩色点の絶対値をとった距離は均衡点と順応色の距離よりも小さかった。これらの結果は閾上色差特性の主要な均衡点が順応色よりも無彩色点により近かったことを示す。この傾向は Red 条件によって明らかになった。

図 4.8 に閾上色差特性の一次導関数を示す。この結果は 4.2.1 節: 原理で説明した通り感度に相当する。閾上色差の特性は2つのピークを持つように見える。例えば、被験者 RK の Red 条件では、2つ目のピークが無彩色点に位置しているようにみえる。従って、閾上色差について複数のピークを持つモデルによる解析が必要だと考えられる。そこで、次の節で記述するとおり、閾上色差特性に対して2つのピークを持つモデル: two-peak モデルによる解析を行った。

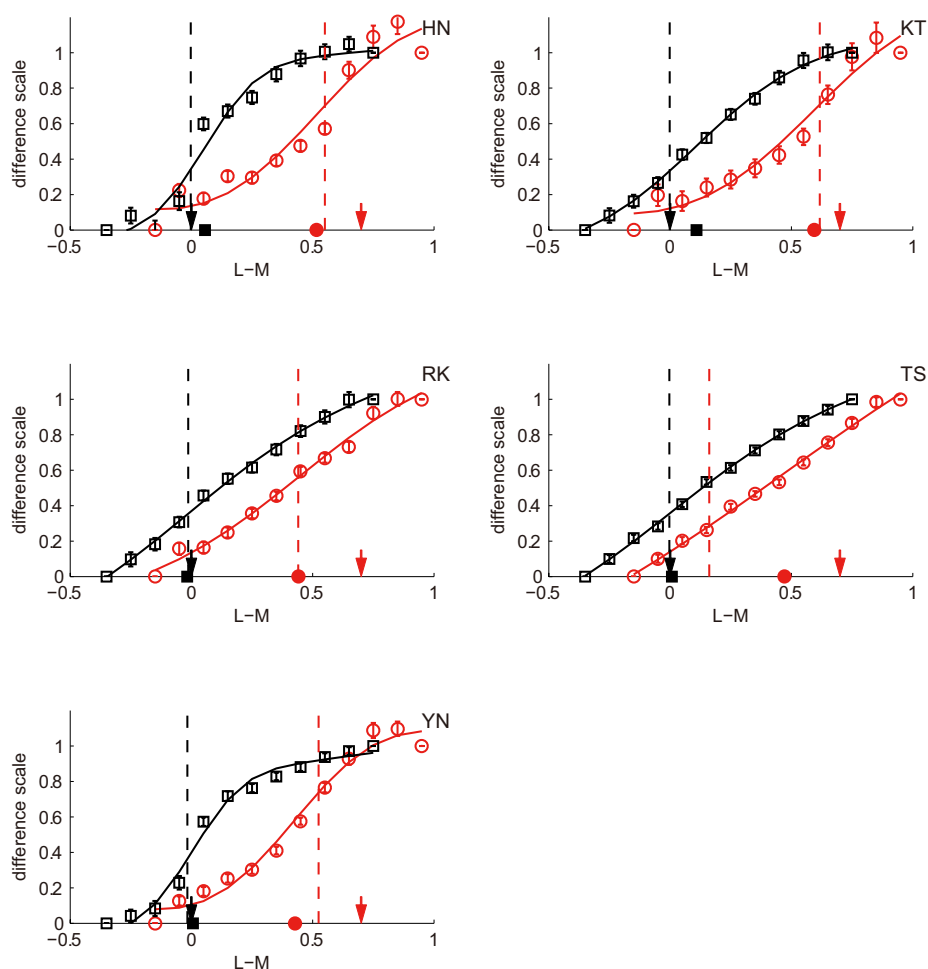


図 4.6 閾上色差特性 (single-peak モデルによる解析)

横軸は参照刺激の色度、縦軸は MLDS によって推定された参照刺激のスケーリング値を示す。パネルごとに異なる被験者の結果が示されている。エラーバーはブートストラップ (1000 回) によって推定された標準偏差を示す。実線は最小二乗法によって当てはめられた式 4.3 を示す。縦の破線は各被験者の知覚的無彩色点を示す。矢印は順応色を示す。

4.4.3 Two-peak モデルによる閾上色差特性の解析

手法

前述したように、閾上色差特性の一次導関数には複数のピークが存在する可能性が示唆された。従って、弁別感度に当てはめた関数の積分ではないモデルによる解析が必要である。閾上色差の結果が single-peak モデルに従わないとしても、色弁別感度と色知覚の間の微分・積分の関係は維持されることが好ましい。そこで、2 つのガウス関数を混合したモデル: two-peak モデルを仮定して閾上色差特性の解析を行った。two-peak モデルは次式

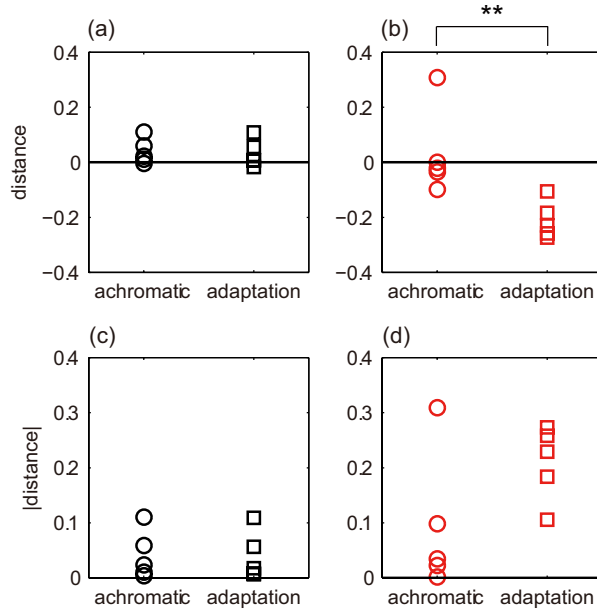


図 4.7 最大色差点と無彩色点 ()・順応色間 () の距離

(a) と (c) は Gray 条件、(b) と (d) は Red 条件の結果をそれぞれ示す。(a) と (b) は符号付き距離、(c) と (d) は絶対距離を示す。並べ替え検定において統計的有意差 (**: $p < 0.01$) が Red 条件の符号付き距離において確認された。

で表される。

$$F_2(x, A, \mu_1, \sigma_1, \mu_2, \sigma_2) = A \int N_1(x, \mu_1, \sigma_1) + (1 - A) \int N_2(x, \mu_2, \sigma_2) \quad (4.4)$$

ここで、 x は L-M 軸上の色度、 A は 2 つの関数の混合比率、 μ_1 、 σ_1 と μ_2 、 σ_2 は累積ガウス分布の平均と分散をそれぞれ示す。混合比率 A は 2 つの関数の総和が 1 になるように制御する。式 4.4 のパラメータは非線形曲線当てはめを用いて推定された。実験 2 では L-M 軸上のデータ数が 12 と限られていたため、2 つのピークを持つモデルを仮定して閾上色差特性の解析を行った。

結果と考察

図 4.9 に示した通り、two-peak モデルは single-peak モデルと比較して、閾上色差特性の歪みをより良く説明できており、正確にデータを説明しているように見える。2 つのモデルのモデルの当てはまりの良さを比較するために、本章では有限修正した赤池情報量基準 (bias-corrected version AIC; AIC_c) とベイズ情報量基準 (BIC)[85, 86] による比較を行った。 AIC_c と BIC はそれぞれ次式で表される。

$$AIC_c = n \log \frac{RSS}{n} + 2k + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (4.5)$$

$$BIC = n \log \frac{RSS}{n} + k \log(n) \quad (4.6)$$

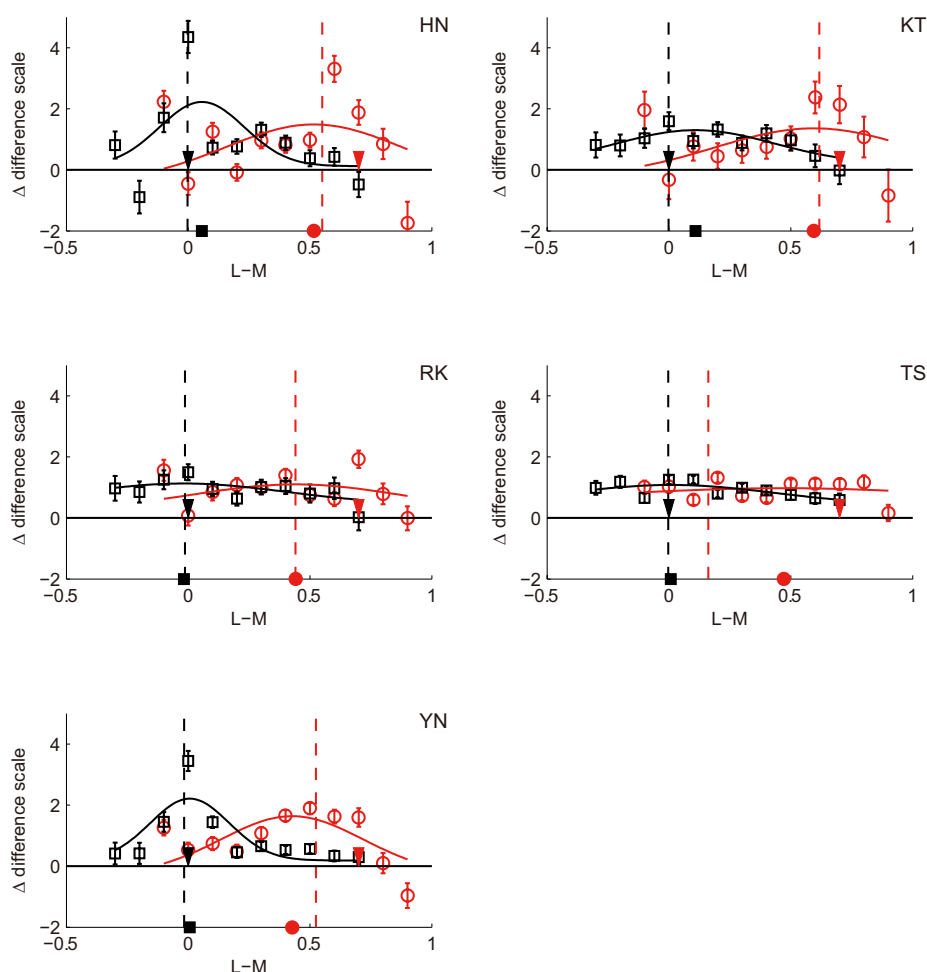


図 4.8 閾上色差特性の一次導関数 (single-peak モデルによる解析)

横軸は参照刺激の色度、縦軸は MLDS により推定された閾上色差特性の一次導関数を示す。パネルごとに異なる被験者の結果が示されている。Gray 条件は正方形、Red 条件は円のシンボルでそれぞれプロットされている。エラーバーはブートストラップ (1000 回) によって推定された標準偏差を示す。実線は最小二乗法によって当てはめられた式 4.3 の一次導関数を示す。横軸上にプロットされた黒塗りのシンボルは single-peak モデルの変曲点の位置を示す。縦の破線は各被験者の知覚的無彩色点を示す。矢印は順応色を示す。

ここで n は解析に使用したデータ点数、 k はモデルに含まれるパラメータ数、 RSS はデータと推定されたモデル間の残差平方和をそれぞれ示す。より小さい AIC_c と BIC はフリーパラメータが多いことによるペナルティに関わらず、モデルがデータによりよく説明できていることを示す。閾上色差特性の解析において、 n は 12、 k は single-peak モデルで 4、two-peak モデルで 5 だった。 AIC_c と BIC の結果を表 4.1、4.2 に示す。two-peak モデルはほとんどの結果において single-peak モデルよりも結果をよく説明できた。two-peak モデルの AIC_c は、被験者 TS の Gray 条件と Red 条件、被験者 YN の Gray 条件を除いて single-peak モデルの AIC_c よりも小さかった。two-peak モデルの BIC は、被験者 TS の Gray 条件を除いて single-peak モデルの BIC よりも小さかった。被験者 TS の閾上色差特性はほぼ直線だったため、single-peak モデルで十分結果を説明できたと考えられる。しか

しながら、基本的には two-peak モデルは single-peak モデルよりもよく閾上色差の結果を説明することができた。

表 4.1 AIC_c によるモデルの評価

Observer	Single-peak model		Two-peak model		AIC	
	Red	Gray	Red	Gray	Red	Gray
HN	-43.16	-50.85	-43.90	-66.21	0.75	15.36
KT	-50.33	-85.19	-56.65	-86.08	6.32	0.89
RK	-68.29	-81.39	-68.66	-83.70	0.36	2.31
TS	-78.74	-97.38	-76.86	-77.19	-1.88	-20.19
YN	-56.87	-62.22	-55.52	-88.12	-1.35	25.91

表 4.2 BIC によるモデルの評価

Observer	Single-peak model		Two-peak model		BIC	
	Red	Gray	Red	Gray	Red	Gray
HN	-46.93	-54.62	-51.48	-73.78	4.55	19.16
KT	-54.11	-88.97	-64.22	-93.66	10.12	4.69
RK	-72.07	-85.17	-76.23	-91.28	4.16	6.11
TS	-82.52	-101.16	-84.44	-84.77	1.92	-16.39
YN	-60.64	-65.99	-63.09	-95.70	2.45	29.71

primary ピークと secondary ピーク (two-peak モデルによって推定された 2 つのピーク) と順応色、無彩色点の距離を解析した結果を図 4.10 に示す。primary ピークはより大きな混合比率 A を持った関数のピークと定義し、secondary ピークはもう一方のピークと定義した。Gray 条件において、並べ替え検定によって「primary ピークと無彩色点の距離」と「primary ピークと順応色の距離」の 2 群間に有意な差が見られないことがわかった。一方、図 4.10(b)、(d) に示した通り、Red 条件では符号付き距離と絶対値距離の両方で 2 群間に有意な差が見られた。primary ピークと無彩色点の絶対値距離は順応色との距離よりも小さかった。これらの結果は primary ピークが順応色よりも無彩色点により近いことを示す。secondary ピークに対しても距離について並べ替え検定を実施した。Gray 条件と Red 条件の両方において、並べ替え検定によって 2 群間に有意な差が見られないことがわかった。しかしながら、いくつかの secondary ピークは順応色と一致するように見える。例えば、Red 条件における被験者 RK と TS の secondary ピークは順応色の位置と一致し、閾上色差特性から推定されたピークの位置とも一致する。

複数のピークが発見された結果は閾上色差特性に異なる色度点に感度最大を持ついく

つかのメカニズムが含まれていることを示唆する。図 4.11 に示した閾上色差特性の一次導関数において見られる複数のピークは single-peak モデルでは説明できない。ほとんどの場合、感度最大となる点は各被験者の無彩色点付近となった。他のピークは背景の色度 (順応色) と一致するようにみえる。この順応色に位置するピークは Crispening 効果 [87, 88] だと考えられる。Crispening 効果は背景刺激の輝度や色度で弁別能力がより良くなる現象である。実験 1 と実験 2 の一致性を考慮すると、1 つのピークが順応色付近に一致する結果は色検出か色弁別の特性を反映する可能性がある。この結果は部分的にはあるが先行研究 [29, 76] の色差評価が弁別閾値の累積とよく合致するという報告と一致する。しかしながら、本実験ではより大きな色差を使用することで無彩色点により近いメカニズムの存在を明らかにした。この傾向は特に Red 条件において明らかになった。これらの結果は閾上色差の判断には複数のメカニズムが関係する事を明らかにし、その感度ピークの内一つは被験者の無彩色点と一致し、もう一つは順応色と一致する。

4.5 2つのタスク間の感度関数の比較

本節では 2 つのタスクの感度曲線を比較した。4.1 節で説明した通り、両方のタスクが共通の感度曲線によって制御されているならば、類似した感度曲線が導出されるべきである。上述してきた通り、色弁別と閾上色差特性は異なり、特に閾上色差特性は複数のピークを持つ事が明らかになった。本節では解析アーティファクトの可能性をなくすためにモデルによる当てはめを用いない感度関数の比較を行った。

4.5.1 手法

最初に、刺激強度と知覚量の関係を定義する共通の感度曲線を仮定し、この感度曲線が色弁別と閾上色差を制御すると仮定した。共通の応答関数において、閾上色差は 2 つの刺激強度の間の応答量の差に相当する。実験 2 において、閾上色差の特性を測定し、MLDS 法によっていくつかの閾上色差判断の組み合わせに基づいて応答関数が推定された。次に、色弁別閾値は関数の傾きの逆数と比例すると仮定した [29]。実験 1 では様々な色コントラスト (ペDESTAL) における色弁別特性が測定された。最後に、応答関数の傾き (以後、感度関数とよぶ) が閾上色差の微分と、色弁別閾値の逆数から導出された。

本章では、実験 1 で図 4.4 に示すように弁別感度が測定され、実験 2 で図 4.9 に示すように閾上色差特性が測定された。この 2 つの異なる実験タスクによって得られたデータから感度関数が導出された。タスク間の感度関数を比較するために、感度関数は最小値が 0、最大値が 1 になるように正規化された。

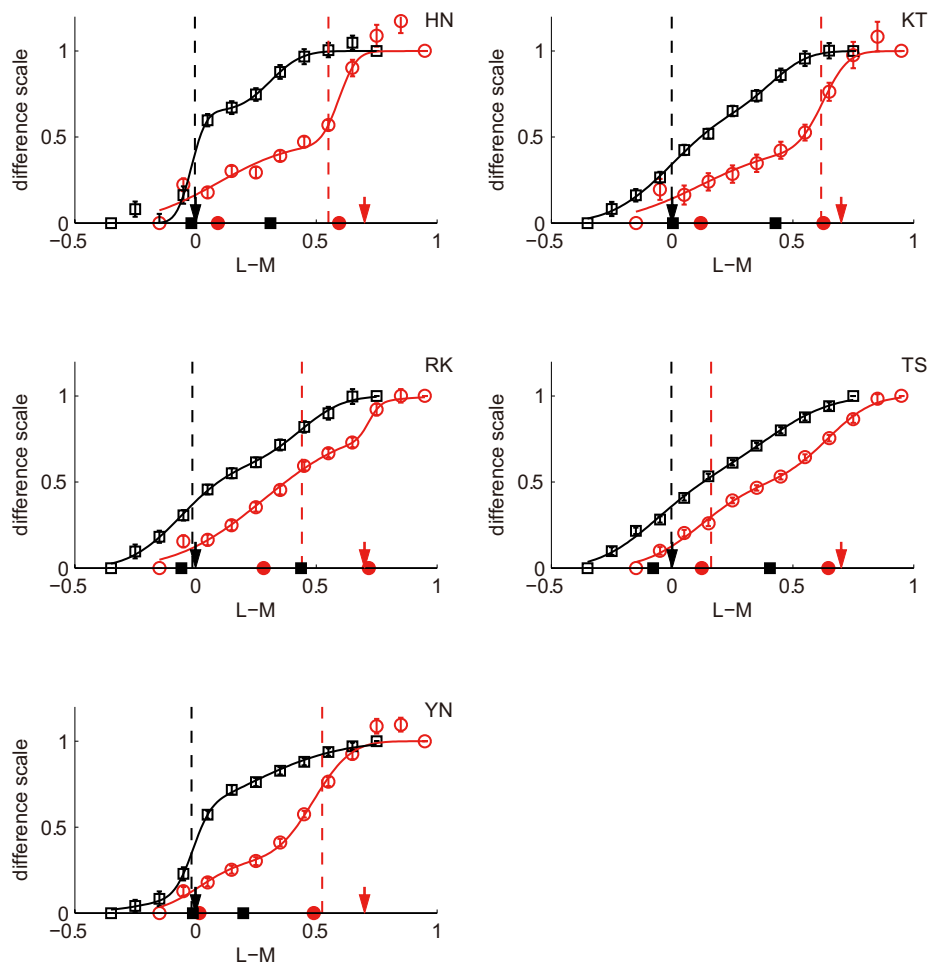


図 4.9 閾上色差特性 (two peak モデルによる解析)

横軸は参照刺激の色度、縦軸は MLDS によって推定された参照刺激のスケーリング値を示す。パネルごとに異なる被験者の結果が示されている。エラーバーはブートストラップ (1000 回) によって推定された標準偏差を示す。実線は非線形当てはめによって当てはめられた式 4.4 を示す。縦の破線は各被験者の知覚的無彩色点を示す。矢印は順応色を示す。

4.5.2 結果と考察

図 4.12 に実験 1 と実験 2 のデータから導出された感度関数を示す。2 つの異なるタスクによって得られた関数のピークは、完全色順応状態である Gray 条件ではほとんど一致するように見える。一方、タスク間の感度関数のピークは不完全色順応状態である Red 条件では異なっているように見える。もし、2 つの感度関数が共通の色メカニズムによって制御されているならば、Gray 条件と Red 条件の両方で R-G メカニズムの均衡点だと仮定した感度ピークは一致するはずである。実験 1 で得られた色弁別の感度関数は順応色の色度にそれぞれ 1 つのピークを持つ事がわかった。しかしながら、実験 2 で得られた閾上色差特性の感度関数は複数のピークを持つ事がわかった。例えば、被験者 RK と TS の Red

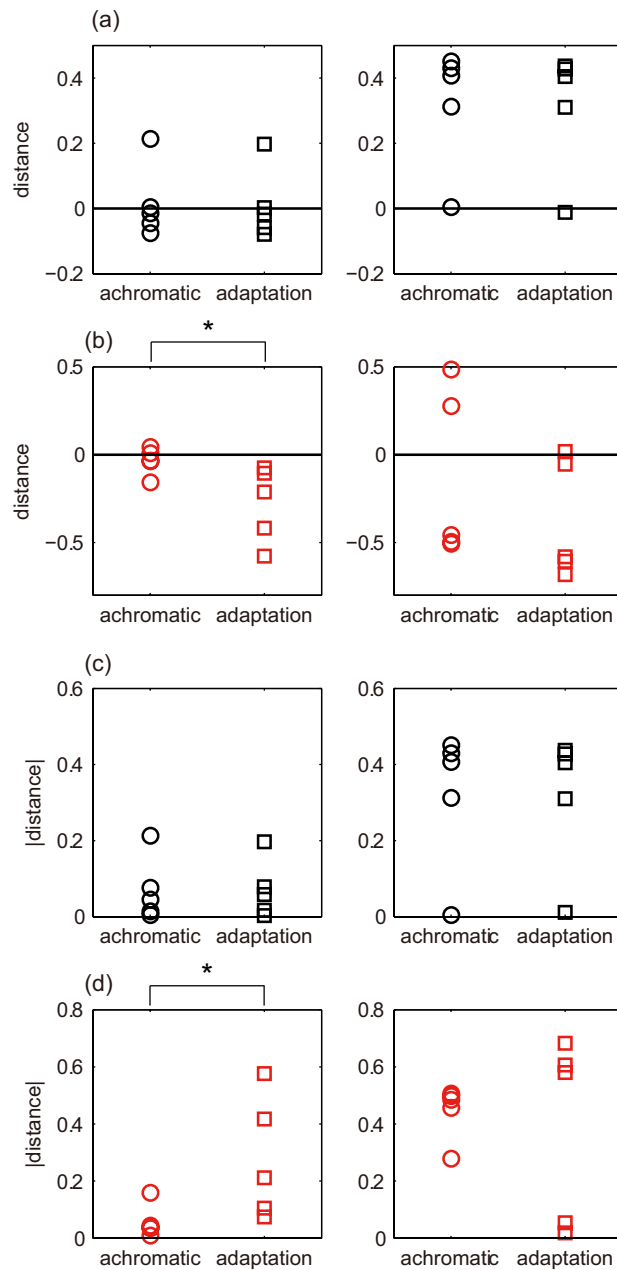


図 4.10 色差ピークと無彩色点 ()・順応色点 () の距離

(a) と (c) は Gray 条件、(b) と (d) は Red 条件の結果をそれぞれ示す。左列と右列にはそれぞれ primary ピークと secondary ピークの結果が示されている。(a) と (b) は符号付き距離、(c) と (d) は絶対距離を示す。並べ替え検定において統計的有意差 (*: $p < 0.05$) が primary ピークの Red 条件において確認された。

条件における感度関数は明らかに 2 つのピークを持ち、一つは無彩色点でもう一つは順応色と一致した。Gray 条件では、被験者 YN を除いて全ての被験者の感度関数において複数のピークが存在した。これらの結果は色弁別と閾上色差評価タスクの間で異なるメカニズムが介在していたことを示唆する。

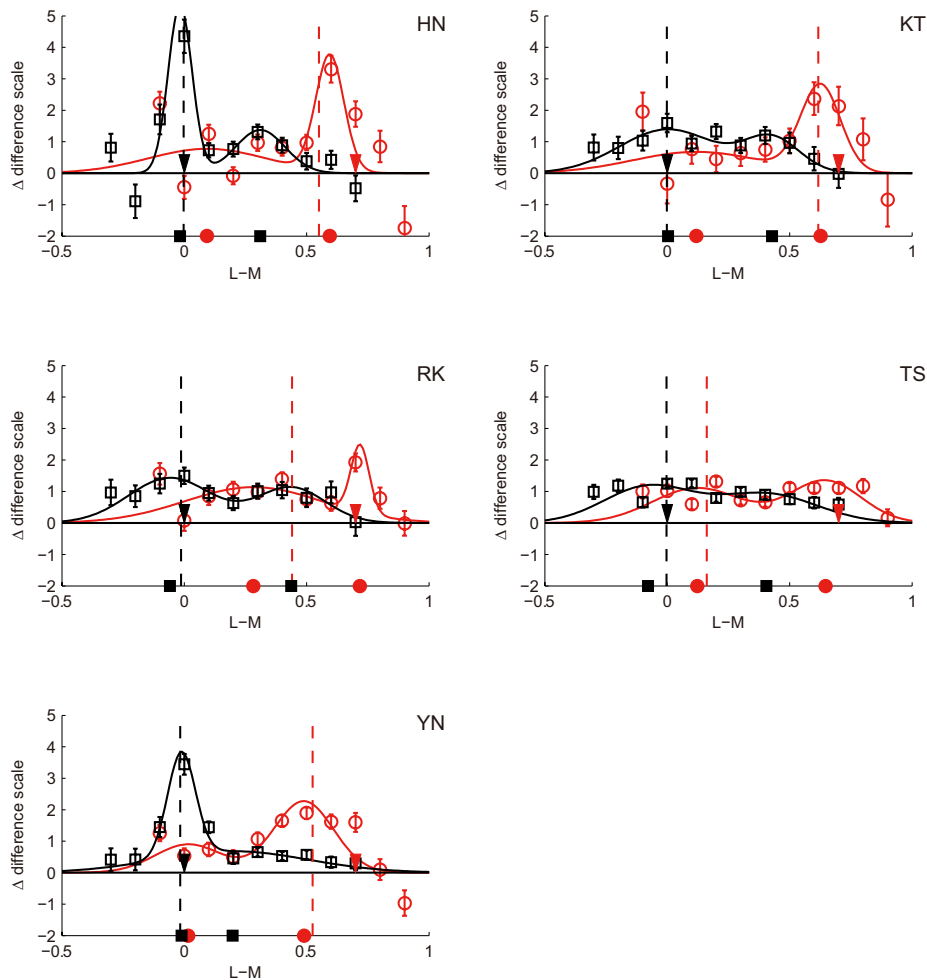


図 4.11 閾上色差特性の一次導関数

横軸は参照刺激の色度、縦軸は MLDS により推定された閾上色差特性の一次導関数を示す。パネルごとに異なる被験者の結果が示されている。Gray 条件は正方形、Red 条件は円のシンボルでそれぞれプロットされている。エラーバーはブートストラップ (1000 回) によって推定された標準偏差を示す。実線は非線形当てはめによって当てはめられた式 4.4 の一次導関数を示す。横軸上にプロットされた黒塗りのシンボルは single-peak モデルの変曲点の位置を示す。縦の破線は各被験者の知覚的無彩色点を示す。矢印は順応色を示す。

4.6 考察

本章では svi 曲線と閾上色差を完全色順応と不完全色順応の 2 つの順応状態で測定した。色弁別の均衡点は無彩色点よりも順応色に近かった (図 4.5)。一方、閾上色差の均衡点は、不完全色順応状態では無彩色点により近かった (図 4.10)。図 4.1 に示したように、共通の応答関数が両方のタスクを制御しているならば、2 つの均衡点は一致するはずである。本章で示した結果は色弁別タスクと閾上での色差評価の間には異なるメカニズムが存在することを示唆する。

4.1 節で説明した通り、共通のメカニズムが色弁別と色の見えを表現できるかは未解明

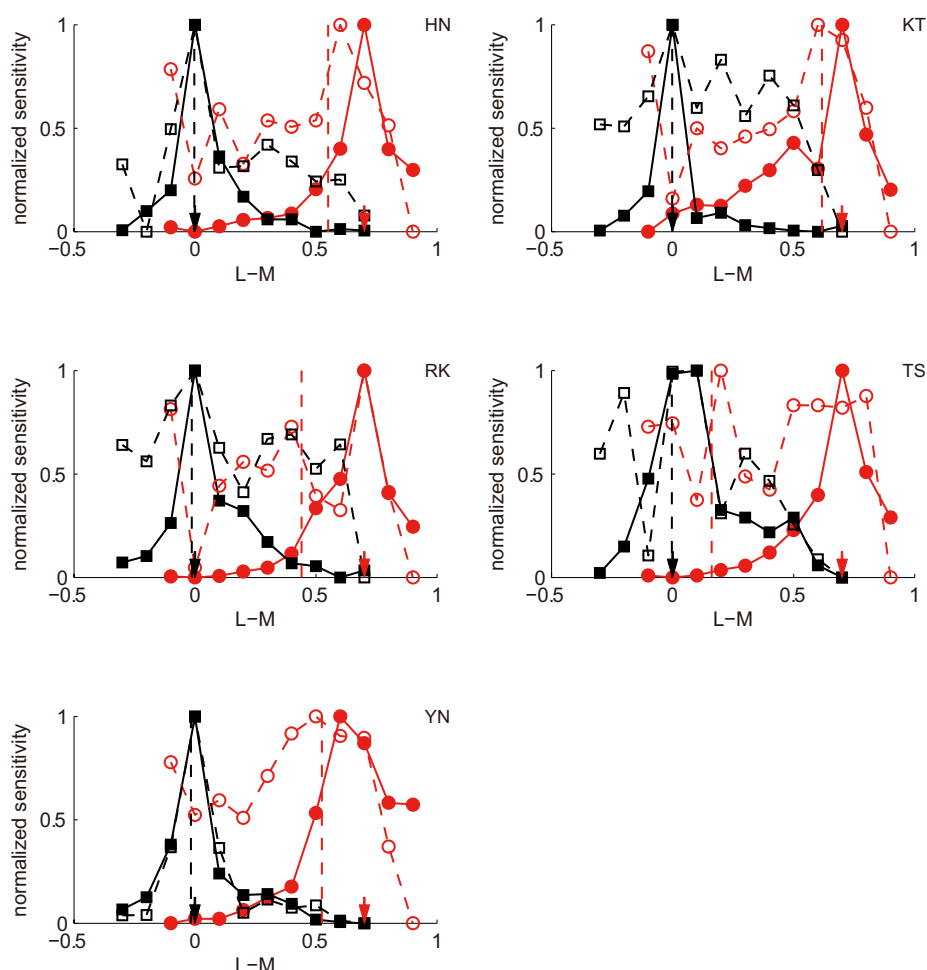


図 4.12 2つの異なるタスクによって得られたデータから推定した感度関数

横軸は参照刺激の色度、縦軸は正規化された感度を示す。パネルごとに異なる被験者の結果が示されている。Gray 条件は黒い線で、Red 条件は赤い線でそれぞれ示されている。弁別実験のデータから推定された感度関数は実線で、閾上色差実験のデータから推定された感度関数は破線でそれぞれ示されている。縦の破線は各被験者の知覚的無彩色点を示す。矢印は順応色を示す。

だった。Hillis & Brainard[29, 30] は共通モデルが色順応とコントラスト順応における色弁別と色の見えの両方を説明できることを示した。一方、本章では色弁別と閾上色差では均衡点異なる感度関数関わっていることを示した。Hillis & Brainard[29] と本章の実験間の結果の違いの原因は不完全色順応だと考えられる。いくつかの先行研究において、不完全色順応が一般的に生じることが示されている [18, 19, 22, 89, 90, 91]。しかしながら、Hillis & Brainard の結果には不完全色順応の影響が見られず、被験者は完全色順応を示した ([29] の Figure 4-7)。もし不完全色順応が生じているならば、順応色は無彩色に見えないため、実験結果が各軸の交点に位置しないはずである。

Hillis & Brainard[29] の結果において不完全色全順応が見られなかったのは、彼らの使用した呈示刺激が背景刺激から連続的に変化するガウス分布を刺激として使用したのが原因である可能性がある。Webster & Wilson[31] は黒い枠線で背景と分離されたテスト刺激

を使用して不完全色順応状態でのコントラスト順応を測定した。不完全色順応は黒枠を使用しない実験でも報告されているが [92]、テスト領域と背景の間の境界は不完全色順応の観察に重要だと考えられる。この仮説を確認するために、背景との境界がないガウス分布を刺激として無彩色点を測定した。実験手続きは 4.2.7 節の予備実験: 無彩色点測定実験で行った手法と同じで、使用した刺激がガウス分布である点だけが異なった。予備実験に参加した 9 名の被験者の内、RK、TS、YN を含んだ 5 名の被験者がこの実験に参加した。図 4.13 に示すように、Red 条件においても知覚的な無彩色点は順応色に近づいた。しかしながら、実験セッション終了後、被験者に背景の色を尋ねた結果、Red 条件の背景は「赤」だと答えた。従って、呈示刺激が黒枠のないガウス分布であっても不完全色順応が生じていたことが示唆された。ただし、行動実験による無彩色点は呈示刺激をガウス分布に変更することで Red 条件においても順応色に近づいた。この結果の違いが先行研究と本研究の違いの重要な点かもしれない。Hillis & Brainard[29] は error-trade off 解析を弁別と見えのデータを解析する際に行った。error-trade off 解析は弁別と見えのデータをまとめて解析し、両方のデータをうまく説明するモデルパラメータを推定する方法である。この解析方法が不完全色順応によって生じた弁別と見えの間の違いをなくすように働いた可能性がある。完全色順応である Gray 条件では、本章でも弁別と閾上色差の均衡点は類似した。従って、完全色順応においては共通の応答関数仮説 [29] が色弁別と色の見えの両方を説明することが可能だと考えられる。しかしながら、不完全色順応においては共通応答関数仮説は、本章で実証した通り、均衡点の違いを説明できない。異なるタスク間の不完全色順応を説明するためには、色情報表現モデルに均衡点に相当するパラメータを追加する必要があるだろう。

Hillis & Brainard[76] は物体検出と物体同定で分離された処理が介在することを報告した。彼らは刺激としてチェッカーボード上に影が落ちたシーン (shadowed) とペンキが塗られたようなシーン (painted) を使用し、それらのコンテキストでの弁別能力と見えのマッチングを調査した。彼らの結果は見えマッチングは 2 つのコンテキストの間で異なり、弁別と同定の結果を説明するには異なるモデルパラメータが必要であることを示した。彼らは表面の見えを補正するようなメカニズムが 2 つのタスク間の違いの原因になったと議論している。本章の結果も、特に不完全色順応において色弁別と色の見えで介在するメカニズムが異なることを示した。しかしながら、本章で使用した刺激は弁別と見えが共通応答関数で説明可能であることを報告した先行研究 [29, 30] と類似している。周辺環境についてははっきりとしたコンテキストを持たない本章の実験刺激に対して、表面の見えを補正するメカニズムが介在したかどうか評価するのは難しい。従って、本章と Hillis & Brainard[30] では異なるメカニズムが弁別と見えの分離に関わったと考えられる。これらの結果は見えの結果に複数の要因が含まれている可能性も暗示する。シーンのコンテキストや不完全色順応の他にも弁別と見えの分離を生じさせる視覚現象が存在すると考えられる。

Webster & Wilson[31] は、不完全色順応ではコントラスト順応による色コントラスト感

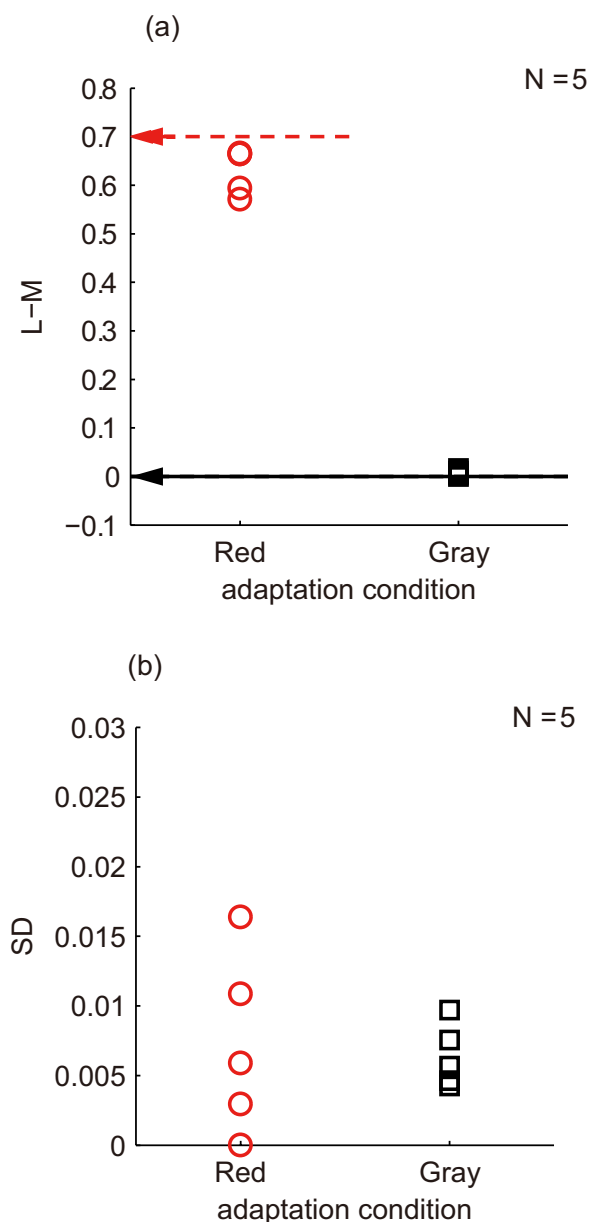


図 4.13 刺激をガウス分布にしたときの無彩色点

縦軸は被験者の“赤”応答が 50% になった色度を示す。丸と四角のプロット点は Red 条件と Gray 条件の結果をそれぞれ示す。水平方向の矢印は各条件の順応色を示す。

度の減少が知覚的な無彩色点ではなく順応刺激の平均色度を基準に生じることを示した。彼らの結果は、コントラスト知覚と色の見えが異なる特性、あるいは異なるメカニズム群によって符号化されていること示唆する。彼らの結果は、異なる色情報表現が色弁別と色の見えに介在しているという点において本章の結果と関係すると考えられる。彼らは 2 つの色要因: 静的 (DC) 成分と動的 (AC) 成分を含んだ刺激を順応刺激として使用した。従って、異なる時間特性を持ったメカニズムが 2 つの色要因によって別々に影響を受けた可能性がある。Webster & Wilson と比較して、本章で使用した順応刺激は静的成分のみだったため、時間特性の違いでは本章の結果を説明できない。先行研究において、順応の時間特

性を用いて弁別と色の見えの間で異なるメカニズムが同定されている。例えば、極めて順応が早いメカニズムは色の見えタスクにおいてのみ観測された [32]。しかしながら、本章で行った実験は極めて順応が早いメカニズムが順応するのに十分な時間 (1 秒間) 呈示されたため、本章の色弁別と色の見えの間の差を説明できない。

先行研究において色弁別感度と無彩色さ (whiteness) の間に強い負の相関が見られることが実証されており、最も小さい閾値は順応色が等エネルギー白色 (EEW) のときに観測された [93]。本章の結果もこの傾向が見られる; Gray 条件における最大感度は Red 条件の最大感度よりも小さかった。しかしながら、本章では弁別感度最大が知覚的な無彩色点と一致しないことを示した。弁別閾値が無彩色さの影響を受けることから、Fechner の法則ほど強い関係ではないが、色弁別と色の見えの間にはなんらかの関係が存在するのかもしれない。先行研究はさらに、無彩色さのスコア (大きいほど色味を感じない) は順応色が EEW のときに最大となり、順応色が EEW から離れるにつれてスコアが小さくなることを報告した。前述した通り、弁別感度は無彩色さと負の相関がある。従って、先行研究の結果から色弁別と色の見えの両方で共通の最適点が存在する可能性が考えられ、弁別と見えの間に EEW のような順応色を基準とした共通のメカニズムが存在するかもしれない。しかしながら、Krauskopf & Gegenfurtner [25] が示したように、最小閾値は L-M 軸上での順応色と独立している。もし EEW によって色弁別と色の見えが制御されているならば、順応色と EEW の距離が大きくなれば色弁別閾値も大きくなるはずである。従って、色弁別は EEW だけでは決定できず、刺激の空間構成など他の要因が影響すると考えられる。

Whittle [88] は明るさについて閾上のスケーリングが弁別データで再現可能であることを示した。一方、本章の結果は色弁別と閾上色差において異なるメカニズムが介在する可能性を示した。Whittle と本研究の違いの一つは呈示刺激に黒枠があったかどうかである。Whittle は呈示刺激に黒枠をつけた場合の効果も調査したが、弁別特性について詳細には調査しなかった。本章の結果は閾上色差特性は複数のメカニズムの影響を受け、感度が最大になる色度は無彩色点と順応色であることを示唆した。先行研究において呈示刺激に黒枠をつけることで、Crispening 効果や継時比較コントラストのような背景の効果が減少することが示唆されている [88, 94, 95, 96]。従って、黒枠を使用することは色弁別タスクと閾上色差タスク間の差を観察するために重要な要因の一つかもしれない。

Smith & Pokorny [80] は非対称マッチング実験によって色の見えがほとんど変化しない領域 (hiatus) が存在することを報告した。一方、閾上色差特性の色差感度は無彩色点で最大になることを本研究では発見した。この発見は先行研究の報告と矛盾するように見える。無彩色点測定実験で記述した通り、本章の無彩色点実験でも無彩色点の標準偏差という形で hiatus に相当する現象が生じていた。図 4.3(b) に示した通り、無彩色点の標準偏差は Gray 条件より Red 条件において大きかった。この結果は無彩色に見える範囲が Gray 条件よりも Red 条件の方が広がったことを意味する。この傾向は先行研究と類似しており、先行研究でも周辺色度と EEW の差が大きくなるにつれて hiatus は広がった。しかしながら、閾上色差特性を測定する際の色パッチの最小の色差は無彩色点の標準偏差より

も十分に大きく、被験者によって異なるが標準偏差の 4 から 15 倍の値であった。従って、閾上色差の結果は hiatus よりも大きな色差の特性を測定していたと考えられる。従って、hiatus と閾上色差の色差感度が最大になるという結果は矛盾しない。

どのようなモデルが本章の結果を説明できるだろうか。本章では色弁別閾値と閾上色差の間で均衡点が異なることを示した。色覚メカニズムを理解するにはどのようにメカニズムの均衡点が決定されるのかが重要だろう。実験 1 の結果は弁別メカニズムの均衡点は順応色であることを示した。色情報表現は錐体応答のような共通のフロントエンドを持っているようにみえるが、輝度感度とユニーク黄色 [21, 97] のように異なる網膜以降の色覚メカニズムが異なる心理物理タスクに介在することが報告されている。輝度と無彩色点・ユニーク黄色の分離と同様に、本章で使用した 2 つのタスク間の均衡点の違いは異なるメカニズムによって生じた可能性がある。実験セッション後、被験者は Red 条件における背景色が赤く見えたと報告した。従って、完全順応状態とは異なり Red 条件では背景に対する赤という知覚は消失していなかった。これは色の見えにおける均衡点が順応色と異なっていたことを示唆する。本章の結果だけでは閾上色差の基準点をどのように決定するのか結論することはできない。複数の色覚メカニズム応答の分布 [15, 31, 44, 98] によって閾上色差の均衡点が決定される可能性が考えられる。もし均衡点が特定の分布で決定されるならば、色覚メカニズム応答が均衡点においてゼロになる必要はない。この場合、Weber の法則によってメカニズムの弁別感度は低下する。また、テスト刺激と背景の色度の差 (コントラスト) と背景色度のような色情報の 2 つの性質 [92, 99] によって閾上色差の均衡点が決定されることが考えられる。本章の閾上色差特性は無彩色点と背景色 (順応色) の 2 つの色度に感度ピークが存在した。本章ではデータ数の制約上、2 つのピークを持つモデルで解析を行ったが、より多くの感度ピークが存在する可能性がある。これらの結果は閾上色差の均衡点の決定には、単純に錐体応答信号を用いるのではなく、異なる色情報表現が含まれている可能性を示唆する。

4.7 本章の総括

本章では色弁別と閾上色差を完全色順応と不完全色順応状態でそれぞれ測定した。その後、2 つの異なる実験で得られたデータから感度関数を推定し、共通の感度関数が 2 つのタスクに介在するかどうか調べた。結果として、感度関数はタスク間でピークの L-M 軸上での位置が異なった。特に不完全色順応における結果から、主要な感度ピーク的位置が 2 つのタスク間で異なることが明らかになった。これらの結果は 2 つのタスクに関与する色情報表現、あるいは色メカニズムが異なる可能性を示唆する。

第 5 章

結論

5.1 総合考察

色情報は検出、形状抽出、同定という役割をもっており、さまざまな視覚情報の基盤となっている。視覚系における色情報表現は、はじめは三色表現だが、その後反対色表現 (cardinal 軸) に変換される。色情報処理はさらに変化し、生理学的研究によって反対色表現以降の皮質においてさまざまな色相に応答するニューロンが発見されている。本論文では視覚系における色情報表現の変化を色相と彩度の観点で心理物理学的に検討した。

第 3 章では多色テクスチャにおける色コントラスト知覚に関する特性を、心理物理学的逆相関法の一つである CI 法と色覚メカニズムモデルに基づく解析を組み合わせで調査した。これまでの多色テクスチャに対する色覚研究ではノイズマスキング実験が広く利用されてきた。先行研究では主に色空間上で 1 次元分布となる多色テクスチャのノイズ効果が調査されてきており、円形分布のように 2 次元に広がるノイズの効果は十分に調査されているとは言えない。複数の色相を含んだノイズテクスチャを使用すれば、高次色覚メカニズムの複数の色相選択メカニズム間の相互作用を明らかにできると考えられた。本論文では解析自由度の高さに着目し CI 法を利用して多色テクスチャのノイズ効果を調査した。ただし、CI 法の基本的な解析では色覚メカニズムの詳細を明らかにできない事が指摘されていた。本論文では数理的なアプローチと組み合わせることでこの問題点を解決し、CI 法で得られたデータから色覚メカニズムのパラメータを推定することを可能にした。その結果、本論文の実験結果は cardinal 軸で十分説明可能であることがわかった。今回使用した弁別課題は、色覚の基本的な機能の一つであり、視覚系において比較的低次の処理段階でも遂行可能なタスクである。従って、今回の実験条件では網膜神経節細胞や外側膝状体で見られる cardinal 軸の影響が大きかった可能性が考えられる。本論文の結果は多色テクスチャの弁別実験では cardinal 軸と高次色覚メカニズムを切り分けることが困難である可能性を示唆する。

第 4 章では色弁別と閾上色差間の彩度表現が共通かどうか調査した。これらのタスクは先行研究において共通のメカニズムが介在すると考えられていたが、不完全色順応とい

う現象は考慮されていなかった。彩度を決定する場合、無彩色点: 相反する色相メカニズムの均衡点をどこに設定するのが重要となる。そこで、本研究では不完全色順応を実験条件に加え、異なる色順応状態における色弁別と閾上色差特性を比較した。2つのタスク間で共通のメカニズムが介在するのであれば、各タスクの均衡点は一致するはずだが、本論文の結果では2つのタスクから推定された均衡点は不完全色順応下では一致しなかった。この結果は弁別と閾上色差にはそれぞれ異なる彩度表現が介在することを示唆する。弁別と閾上色差の間には密接な関係があり、同一メカニズムで説明できると考えられてきた。しかし、本論文の結果から色弁別と閾上色差には異なるメカニズムが介在することが示された。

以上、本論文では視覚系における色情報表現について色相と彩度の観点から検討した。第3章では色相の観点で詳細に解析したが、実験条件としてはノイズの平均色度が無彩色になるか有彩色になるかという彩度に関する条件が含まれている。それぞれのノイズ条件におけるCIの色変調は無彩色と有彩色の間で異なっていた。しかし、このノイズの彩度の違いを同一モデルで説明する事ができた。このモデルは順応色を基準に色相メカニズムが展開しており、第4章で明らかにしたように、弁別は順応色を基準に感度が最適化されていることと一致する。ただし、第3章では完全色順応状態でしか実験を行っていないため、不完全色順応状態における多色テクスチャに対する均衡点が順応色であるとはかぎらない。しかしながら、弁別を遂行する場合は順応色と無彩色が一致するかどうかに関わらず順応色において弁別感度が最大になることから、多色テクスチャにおける色弁別特性も順応色で弁別感度が最大となると考えられる。

これまで同一色情報表現だと考えられていた色弁別と閾上色差において、異なる色情報表現(特に異なる彩度表現)が介在する事を示し、タスクによって関わる色情報表現が異なることを示した。生理学的にはニホンザルのIT野において、弁別と色カテゴリ判断で応答特性が異なるニューロンが発見されている[100]。これはタスクによって適切な色選択性ニューロンが存在し、最適な色情報表現が構築されている可能性を暗示する。さらに、心理物理学的には、領域検出と形状弁別[101]や色検出と色カテゴリ[102]において、異なる色情報表現が介在することが示唆されている。従って、色情報表現の変化を明らかにするには異なるタスク間の比較が重要であると考えられる。本論文で使用した心理物理学的逆相関法は運動方向や方位など、さまざまな視覚情報・タスクに適用可能であり、その色情報表現は本論文で提案したモデル解析によって明らかにすることができる。本論文で提案した手法でさまざまなタスクにおける色情報表現を明らかにしていくことで、ヒトの視覚系における色情報表現の変遷が明らかになっていくと考えられる。

色覚研究ではcardinal軸という色空間によって心理物理学的データや生理学的データが整理され、さらなる色情報表現の存在が示唆されてきた。これらの結果はcardinal軸とは異なる色空間の存在を暗示する。色情報表現は視覚情報の基盤であり、新たな色空間は色覚だけでなく、視覚系における視覚情報処理に新たな観点を与えるだろう。本論文ではタスクに最適化された色情報表現を明らかにするのに有用な、解析自由度が高く、包括的な

解析が可能な手法を提案した。本論文の成果が視覚系における色情報表現を明らかにし、視覚系の処理メカニズムを解明する基礎になることを期待する。

5.2 総括

第 1 章で本論文の検討事項について、

- 多色テクスチャにおける色コントラスト知覚はいくつの色相で表現されるか。そして、その色相の組み合わせは反対色かどうか。
- 色弁別と色の見えの間に色コントラストに対する応答特性は単一かどうか。

上記の 2 つを挙げた。これらの検討事項について本論文で得られた成果をまとめる。

第 3 章において、CI 法とモデル解析を組み合わせ、色コントラスト知覚における色情報表現に必要な色相の数を推定した。基本的な CI 解析では多色テクスチャにおける色コントラスト知覚は 4 つの色相、さらにいえば反対色によって今回の実験結果を説明できることがわかった。これらの結果はノイズマスキングにおいて cardinal 軸に類似したメカニズムで結果が説明できることを示した先行研究と一致する。

第 4 章において、順応色と無彩色点一致しない不完全色順応状態において、色弁別と色の見えに相当する閾上色差の特性を比較した。その結果、遂行するタスクによって感度が最適化されている点「均衡点」が異なることがわかった。これは彩度を表現する際に必要な原点が異なることを示し、タスクによって異なる彩度表現が存在することを示唆する。この傾向は不完全色順応状態において明らかになり、完全色順応状態では見られなかった。この結果は色弁別と色の見えが同一モデルで説明できるという先行研究と異なる。先行研究と本論文の結果の違いは不完全色順応において特性を比較したことに起因すると考えられる。従って、タスクに伴う色情報表現の変化を明らかにする手法の一つとして不完全色順応は有用だと考えられる。

これらの結果から、本論文では視覚系における色情報表現はタスクによって関わるメカニズムが異なる可能性を示した。この結果は彩度の観点から明らかになったことだが、色相の観点でもタスクによっては反対色以降の色情報表現を明らかにできる可能性がある。その際、本論文で提案した CI 法と色覚モデルを組み合わせた解析によって色情報表現の詳細を明らかにすることができるだろう。本論文の成果によって、比較すべき先行研究が整理され、色情報表現の変化の様相が明らかになっていくと期待する。

参考文献

- [1] V. Smith and J. Pokorny: “Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm”, *Vision Research*, **15**, 2, pp. 161–171 (1975).
- [2] A. Stockman and L. T. Sharpe: “The spectral sensitivities of the middle-and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype”, *Vision Research*, **40**, 13, pp. 1711–1737 (2000).
- [3] G. Svaetichin: “Spectral response curves from single cones”, *Acta Physiologica Scandinavica*, **39**, Supplementum 134, pp. 17–46 (1956).
- [4] H. Wässle, B. Boycott and J. Röhrenbeck: “Horizontal cells in the monkey retina: cone connections and dendritic network”, *European Journal of Neuroscience*, **1**, 5, pp. 421–435 (1989).
- [5] V. C. Smith, B. B. Lee, J. Pokorny, P. R. Martin and A. Valberg: “Responses of macaque ganglion cells to the relative phase of heterochromatically modulated lights”, *Journal of Physiology*, **458**, pp. 191–221 (1992).
- [6] 日本視覚学会: “視覚情報処理ハンドブック”, 朝倉書店 (2000).
- [7] R. L. De Valois, I. Abramov and G. H. Jacobs: “Analysis of response patterns of lgn cells”, *Journal of the Optical Society of America*, **56**, 7, pp. 966–977 (1966).
- [8] P. Lennie, J. Krauskopf and G. Sclar: “Chromatic mechanisms in striate cortex of macaque”, *Journal of Neuroscience*, **10**, 2, pp. 649–669 (1990).
- [9] D. C. Kiper, S. B. Fenstemaker and K. R. Gegenfurtner: “Chromatic properties of neurons in macaque area V2”, *Visual Neuroscience*, **14**, 06, pp. 1061–1072 (1997).
- [10] K. R. Gegenfurtner, D. C. Kiper and J. B. Levitt: “Functional properties of neurons in macaque area V3”, *Journal of Neurophysiology*, **77**, 4, pp. 1906–1923 (1997).
- [11] H. Komatsu, Y. Ideura, S. Kaji and S. Yamane: “Color selectivity of neurons in the inferior temporal cortex of the awake macaque monkey”, *Journal of Neuroscience*, **12**, 2, pp. 408–424 (1992).
- [12] A. Hanazawa, H. Komatsu and I. Murakami: “Neural selectivity for hue and saturation of colour in the primary visual cortex of the monkey”, *European Journal of Neuroscience*, **12**, 5, pp. 1753–1763 (2000).
- [13] 内川恵二, 栗木一郎, 篠田博之: “開口色と表面色モードにおける色空間のカテゴリカ

- ル色名領域”, 照明学会誌, **77**, 6, pp. p346–354 (1993).
- [14] 内川恵二: “色覚のメカニズム 色を見る仕組み”, 朝倉書店 (1998).
- [15] I. Kuriki, P. Sun, K. Ueno, K. Tanaka and K. Cheng: “Hue selectivity in human visual cortex revealed by functional magnetic resonance imaging”, *Cerebral Cortex*, pp. 4869–4884 (2015).
- [16] R. Snowden, R. J. Snowden, P. Thompson and T. Troscianko: “Basic vision: an introduction to visual perception”, Oxford University Press (2012).
- [17] M. D. Fairchild: “Color appearance models”, John Wiley & Sons (1998).
- [18] M. D. Fairchild: “Formulation and testing of an incomplete-chromatic-adaptation model”, *Color Research and Application*, **16**, 4, pp. 243–250 (1991).
- [19] Y. Nayatani: “Examination of adaptation coefficients for incomplete chromatic adaptation”, *Color Research and Application*, **22**, 3, pp. 156–164 (1997).
- [20] M. D. Fairchild and L. Reniff: “Time-course of chromatic adaptation for color-appearance judgments”, *Journal of the Optical Society of America A*, **12**, 5, pp. 824–833 (1995).
- [21] I. Kuriki and D. I. MacLeod: “Chromatic adaptation aftereffects on luminance and chromatic channels”, *John Dalton’s colour vision legacy*, pp. 73–83 (1998).
- [22] I. Kuriki: “The loci of achromatic points in a real environment under various illuminant chromaticities”, *Vision Research*, **46**, 19, pp. 3055–3066 (2006).
- [23] 日本色彩学会: “新編色彩科学ハンドブック”, 東京大学出版会, 第3版 (2011).
- [24] S. E. Palmer: “Vision science: Photons to phenomenology”, Vol. 1, MIT press Cambridge, MA (1999).
- [25] J. Krauskopf and K. Gegenfurtner: “Color discrimination and adaptation”, *Vision Research*, **32**, 11, pp. 2165–2175 (1992).
- [26] V. Smith, J. Pokorny and H. Sun: “Chromatic contrast discrimination: Data and prediction for stimuli varying in l and m cone excitation”, *Color Research and Application*, **25**, 2, pp. 105–115 (2000).
- [27] A. J. Zele, V. C. Smith and J. Pokorny: “Spatial and temporal chromatic contrast: Effects on chromatic discrimination for stimuli varying in l- and m-cone excitation”, *Visual Neuroscience*, **23**, 3-4, pp. 495–501 (2006).
- [28] D. Cao and Y. H. Lu: “Chromatic discrimination: Differential contributions from two adapting fields”, *Journal of the Optical Society of America A*, **29**, 2, pp. A1–A9 (2012).
- [29] J. M. Hillis and D. H. Brainard: “Do common mechanisms of adaptation mediate color discrimination and appearance? uniform backgrounds”, *Journal of the Optical Society of America A*, **22**, 10, pp. 2090–2106 (2005).
- [30] J. M. Hillis and D. H. Brainard: “Do common mechanisms of adaptation mediate color discrimination and appearance? contrast adaptation”, *Journal of the Optical Society of America A*, **24**, 8, pp. 2122–2133 (2007).

- [31] M. A. Webster and J. A. Wilson: “Interactions between chromatic adaptation and contrast adaptation in color appearance”, *Vision Research*, **40**, 28, pp. 3801–3816 (2000).
- [32] O. Rinner and K. R. Gegenfurtner: “Time course of chromatic adaptation for color appearance and discrimination”, *Vision Research*, **40**, 14, pp. 1813–1826 (2000).
- [33] P. K. Kaiser and R. M. Boynton: “Human color vision”, Optical Society of America, second edition (1996).
- [34] D. I. MacLeod and R. M. Boynton: “Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance”, *Journal of the Optical Society of America*, **69**, 8, pp. 1183–1186 (1979).
- [35] A. Derrington, J. Krauskopf and P. Lennie: “Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque”, *The Journal of Physiology*, **357**, 1, pp. 241–265 (1984).
- [36] J. Krauskopf, D. Williams and D. Heeley: “Cardinal directions of color space”, *Vision Research*, **22**, 9, pp. 1123–1131 (1982).
- [37] 内川恵二, 岡嶋克典: “感覚・知覚実験法”, 朝倉書店 (2008).
- [38] L. T. Maloney and J. N. Yang: “Maximum likelihood difference scaling”, *Journal of Vision*, **3**, 8, pp. 573–585 (2003).
- [39] R. W. Fleming, F. Jäkel and L. T. Maloney: “Visual perception of thick transparent materials”, *Psychological science*, **22**, 6, pp. 812–820 (2011).
- [40] F. Devinck and K. Knoblauch: “A common signal detection model accounts for both perception and discrimination of the watercolor effect”, *Journal of Vision*, **12**, 3, pp. 1–14 (2012).
- [41] R. T. Eskew: “Higher order color mechanisms: a critical review”, *Vision Research*, **49**, 22, pp. 2686–2704 (2009).
- [42] M. A. Webster and J. D. Mollon: “The influence of contrast adaptation on color appearance”, *Vision Research*, **34**, 15, pp. 1993–2020 (1994).
- [43] M. A. Webster and J. D. Mollon: “Changes in colour appearance following post-receptoral adaptation”, *Nature*, **349**, 6306, pp. 235–238 (1991).
- [44] I. Kuriki: “Aftereffect of contrast adaptation to a chromatic notched-noise stimulus”, *Journal of the Optical Society of America A*, **24**, 7, pp. 1858–1872 (2007).
- [45] M. J. Sankeralli and K. T. Mullen: “Ratio model for suprathreshold hue-increment detection”, *Journal of the Optical Society of America A*, **16**, 11, pp. 2625–2637 (1999).
- [46] K. R. Gegenfurtner and D. C. Kiper: “Contrast detection in luminance and chromatic noise”, *Journal of the Optical Society of America A*, **9**, 11, pp. 1880–1888 (1992).
- [47] A. Li and P. Lennie: “Mechanisms underlying segmentation of colored textures”, *Vision Research*, **37**, 1, pp. 83–97 (1997).
- [48] M. J. Sankeralli and K. T. Mullen: “Postreceptoral chromatic detection mechanisms revealed by noise masking in three-dimensional cone contrast space”, *Journal of the Optical*

- Society of America A, **14**, 10, pp. 2633–2646 (1997).
- [49] M. D’Zmura and K. Knoblauch: “Spectral bandwidths for the detection of color”, *Vision Research*, **38**, 20, pp. 3117–3128 (1998).
 - [50] F. Giulianini and R. T. Eskew: “Chromatic masking in the $([\Delta] l, [\Delta] m/m)$ plane of cone-contrast space reveals only two detection mechanisms”, *Vision Research*, **38**, 24, pp. 3913–3926 (1998).
 - [51] N. Goda and M. Fujii: “Sensitivity to modulation of color distribution in multicolored textures”, *Vision Research*, **41**, 19, pp. 2475–2485 (2001).
 - [52] R. T. Eskew, J. R. Newton and F. Giulianini: “Chromatic detection and discrimination analyzed by a bayesian classifier”, *Vision Research*, **41**, 7, pp. 893–909 (2001).
 - [53] J. R. Newton and R. T. Eskew: “Chromatic detection and discrimination in the periphery: A postreceptoral loss of color sensitivity”, *Visual Neuroscience*, **20**, 5, pp. 511–521 (2003).
 - [54] D. T. Lindsey and A. M. Brown: “Masking of grating detection in the isoluminant plane of dkl color space”, *Visual Neuroscience*, **21**, 3, pp. 269–273 (2004).
 - [55] G. Monaci, G. Menegaz, S. Süssstrunk and K. Knoblauch: “Chromatic contrast detection in spatial chromatic noise”, *Visual Neuroscience*, **21**, 3, pp. 291–294 (2004).
 - [56] T. Hansen and K. R. Gegenfurtner: “Higher level chromatic mechanisms for image segmentation”, *Journal of Vision*, **6**, 3, pp. 239–259 (2006).
 - [57] T. Hansen, M. Giesel and K. R. Gegenfurtner: “Chromatic discrimination of natural objects”, *Journal of Vision*, **8**, 1, pp. 1–19 (2008).
 - [58] M. Giesel, T. Hansen and K. R. Gegenfurtner: “The discrimination of chromatic textures”, *Journal of Vision*, **9**, 9, pp. 11, 1–28 (2009).
 - [59] T. Hansen and K. R. Gegenfurtner: “Higher order color mechanisms: Evidence from noise-masking experiments in cone contrast space”, *Journal of Vision*, **13**, 1, pp. 1–21 (2013).
 - [60] T. Hansen and K. R. Gegenfurtner: “Classification images for chromatic signal detection”, *Journal of the Optical Society of America A*, **22**, 10, pp. 2081–2089 (2005).
 - [61] H. Dai and C. Michey: “Psychophysical reverse correlation with multiple response alternatives.”, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **36**, 4, pp. 976–993 (2010).
 - [62] A. Ahumada Jr: “Perceptual classification images from vernier acuity masked by noise”, *Perception*, **25**, ECVF Abstract Supplement (1996).
 - [63] J. M. Gold, R. F. Murray, P. J. Bennett and A. B. Sekuler: “Deriving behavioural receptive fields for visually completed contours”, *Current Biology*, **10**, 11, pp. 663–666 (2000).
 - [64] L. Kontsevich and C. Tyler: “What makes mona lisa smile?”, *Vision Research*, **44**, 13, pp. 1493–1498 (2004).

- [65] R. Bouet and K. Knoblauch: “Perceptual classification of chromatic modulation”, *Visual Neuroscience*, **21**, 3, pp. 283–289 (2004).
- [66] E. Brenner, J. Granzier and J. Smeets: “Perceiving colour at a glimpse: The relevance of where one fixates”, *Vision Research*, **47**, 19, pp. 2557–2568 (2007).
- [67] K. Knoblauch and L. Maloney: “Estimating classification images with generalized linear and additive models”, *Journal of Vision*, **8**, 16, pp. 1–19 (2008).
- [68] D. H. Brainard: “The psychophysics toolbox”, *Spatial Vision*, **10**, 4, pp. 433–436 (1997).
- [69] D. G. Pelli: “The videotoolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies”, *Spatial Vision*, **10**, 4, pp. 437–442 (1997).
- [70] R. Murray: “Classification images: A review”, *Journal of Vision*, **11**, 5, pp. 1–25 (2011).
- [71] B. Conway: “Spatial structure of cone inputs to color cells in alert macaque primary visual cortex (v-1)”, *Journal of Neuroscience*, **21**, 8, pp. 2768–2783 (2001).
- [72] K. T. Mullen: “Colour vision as a post-receptoral specialization of the central visual field”, *Vision Research*, **31**, 1, pp. 119–30 (1991).
- [73] K. T. Mullen and F. A. A. Kingdom: “Losses in peripheral colour sensitivity predicted from “hit and miss” post-receptoral cone connections”, *Vision Research*, **36**, 13, pp. 1995–2000 (1996).
- [74] 永田憲範: “視覚探索パラダイムを用いた色覚メカニズムに関する研究”, PhD thesis, 豊橋技術科学大学 (2002).
- [75] P. Lennie: “Color coding in the cortex”, *Color Vision: From Genes to Perception* (Eds. by K. R. Gegenfurtner and L. T. Sharpe), Cambridge University Press, pp. 235–247 (1999).
- [76] J. M. Hillis and D. H. Brainard: “Distinct mechanisms mediate visual detection and identification”, *Current Biology*, **17**, 19, pp. 1714–1719 (2007).
- [77] E. Chichilnisky and B. A. Wandell: “Trichromatic opponent color classification”, *Vision Research*, **39**, 20, pp. 3444–3458 (1999).
- [78] D. Jameson and L. M. Hurvich: “Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. i. chromatic responses and spectral saturation”, *Journal of the Optical Society of America*, **45**, 7, pp. 546–552 (1955).
- [79] J. Krauskopf and Q. Zaidi: “Induced desensitization”, *Vision Research*, **26**, 5, pp. 759–762 (1986).
- [80] V. C. Smith and J. Pokorny: “Color contrast under controlled chromatic adaptation reveals opponent rectification”, *Vision Research*, **36**, 19, pp. 3087–3105 (1996).
- [81] G. Wyszecki and W. S. Stiles: “Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae”, Wiley New York, second edition (1982).
- [82] J. E. Thornton and E. N. Pugh: “Red/green color opponency at detection threshold”, *Science*, **219**, 4581, pp. 191–193 (1983).
- [83] E. Switkes, A. Bradley and K. K. De Valois: “Contrast dependence and mechanisms of

- masking interactions among chromatic and luminance gratings”, *Journal of the Optical Society of America A*, **5**, 7, pp. 1149–1162 (1988).
- [84] K. Knoblauch and L. T. Maloney: “MLDS: Maximum likelihood difference scaling in R”, *Journal of Statistical Software*, **25**, 2, pp. 1–26 (2008).
- [85] H. Akaike: “A new look at the statistical model identification”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **19**, 6, pp. 716–723 (1974).
- [86] K. P. Burnham and D. R. Anderson: “Multimodel inference understanding aic and bic in model selection”, *Sociological Methods and Research*, **33**, 2, pp. 261–304 (2004).
- [87] H. Takasaki: “Lightness change of grays induced by change in reflectance of gray background”, *Journal of the Optical Society of America*, **56**, 4, pp. 504–509 (1966).
- [88] P. Whittle: “Brightness, discriminability and the “crispness effect””, *Vision Research*, **32**, 8, pp. 1493–1507 (1992).
- [89] M. D. Fairchild and P. Lennie: “Chromatic adaptation to natural and incandescent illuminants”, *Vision Research*, **32**, 11, pp. 2077–2085 (1992).
- [90] I. Kuriki and K. Uchikawa: “Adaptive shift of visual sensitivity balance under ambient illuminant change”, *Journal of the Optical Society of America A*, **15**, 9, pp. 2263–2274 (1998).
- [91] I. Kuriki: “Lightness dependence of achromatic loci in color-appearance coordinates”, *Frontiers in Psychology*, **6**, pp. 1–10 (2015).
- [92] V. Ekroll, F. Faul, R. Niederée and E. Richter: “The natural center of chromaticity space is not always achromatic: A new look at color induction”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **99**, 20, pp. 13352–13356 (2002).
- [93] K. Kawamoto, T. Inamura, H. Yaguchi and S. Shioiri: “Color discrimination characteristics depending on the background color in the (l, m) plane of a cone space”, *Optical Review*, **10**, 5, pp. 391–397 (2003).
- [94] F. Faul, V. Ekroll and G. Wendt: “Color appearance: The limited role of chromatic surround variance in the “gamut expansion effect””, *Journal of Vision*, **8**, 3, p. 30 (2008).
- [95] V. Ekroll and F. Faul: “Transparency perception: The key to understanding simultaneous color contrast”, *Journal of the Optical Society of America A*, **30**, 3, pp. 342–352 (2013).
- [96] D. Xing, A. Ouni, S. Chen, H. Sahmoud, J. Gordon and R. Shapley: “Brightness–color interactions in human early visual cortex”, *The Journal of Neuroscience*, **35**, 5, pp. 2226–2232 (2015).
- [97] S. J. Ahn and D. I. MacLeod: “Link-specific adaptation in the luminance and chromatic channels”, *Vision Research*, **33**, 16, pp. 2271–2286 (1993).
- [98] N. C. Rust, V. Mante, E. P. Simoncelli and J. A. Movshon: “How mt cells analyze the motion of visual patterns”, *Nature Neuroscience*, **9**, 11, pp. 1421–1431 (2006).
- [99] D. I. MacLeod: “New dimensions in color perception”, *Trends in Cognitive Sciences*, **7**,

- 3, pp. 97–99 (2003).
- [100] K. Koida and H. Komatsu: “Effects of task demands on the responses of color-selective neurons in the inferior temporal cortex”, *Nature Neuroscience*, **10**, 1, pp. 108–116 (2007).
- [101] T. Nagai and K. Uchikawa: “Different hue coding underlying figure segregation and region detection tasks”, *Journal of Vision*, **9**, 9, pp. 1–19 (2009).
- [102] C. Witzel and K. R. Gegenfurtner: “Categorical sensitivity to color differences”, *Journal of Vision*, **13**, 7, pp. 1–33 (2013).

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々の御指導と御協力を賜りました。

研究を進めるにあたり生じた苦悩や困難に対して、時に優しく、時に厳しくご指導頂いた豊橋技術科学大学情報・知能工学系中内茂樹教授に感謝申し上げます。

研究方針や実験計画、論文執筆に至るまで、あらゆる点で熱心かつ丁寧にご指導頂いた永井岳大准教授（現：山形大学大学院理工学研究科）に、厚く御礼申し上げます。

本研究に関連する基礎知識や結果について議論して頂いた、豊橋技術科学大学エレクトロニクス先端融合研究センター鯉田孝和准教授、同研究センター南哲人准教授、豊橋技術科学大学情報・知能工学系東広志助教に感謝致します。

本論文をまとめるにあたり貴重なご意見を頂いた本学三浦純教授、北崎充晃准教授に深く感謝申し上げます。研究を進める上で貴重なご助言を頂いた本学情報・知能工学系の先生方に深く感謝申し上げます。

本論文の第4章をまとめるにあたり多大なるご意見、ご指導を頂いた東北大学電気通信研究所栗木一郎准教授に心より感謝致します。また、この研究は東北大学電気通信研究所の共同プロジェクト研究（H27/A05）の支援を賜り、研究打ち合わせや研究会における議論によりまとめあげることができました。

本研究の遂行にあたり、本学テラーメイド・バトンゾーン教育プログラム、および本学大学院特別支援学生により、多大なる支援を受けましたことを、ここに深く感謝致します。

本論文をまとめるにあたり過ごした視覚認知情報学研究室において、数多くの方々のご協力を賜りました。日頃から研究だけでなく生活面においても大変お世話になった河合由紀氏、石橋妙子氏、色覚研究に必要不可欠な色覚検査についてご教示頂いた荒木佳苗博士（伊藤光学工業株式会社）、豊田敏裕博士（現：静岡県工業技術研究所機械科主任研究員）に感謝申し上げます。研究室であらゆる面で数多くの助言を頂いた諸先輩方、多くの苦楽をともにした同輩、後輩諸君に感謝致します。

最後に、長きに渡る学生生活を生活面と精神面の両方で支えてくれた両親、姉と兄に感謝致します。

研究業績目録

学術論文

- Tomoharu SATO, Takehiro NAGAI, and Shigeki NAKAUCHI, “ Reverse correlation analysis of chromatic contrast perception based on chromatic mechanism models, ” Optical Review, Vol.21 (5), pp.526-540 (2014)
- Tomoharu SATO, Takehiro NAGAI, Ichiro KURIKI, and Shigeki NAKAUCHI, “ Dissociation of Equilibrium Points for Color-Discrimination and Color-Appearance Mechanisms in Incomplete Chromatic Adaptation, ” Journal of the Optical Society of America A (accepted)

国際学会発表

- Tomoharu SATO, Takehiro NAGAI, Shigeki NAKAUCHI, “ Individual differences in higher-order chromatic mechanisms measured with Classification Image technique ”, International Colour Vision Society 2011(ICVS2011, Kongsberg, Norway), p.63, 2011/7/1-5
- Tomoharu SATO, Takehiro NAGAI, Shigeki NAKAUCHI, ”Chromatic signal detection on a heterochromatic texture with a color distribution away from an adaptation color”, Vision Sciences Society 12th Annual Meeting (VSS2012, Naples, USA), Journal of Vision, Vol.12, No.9, p.55, 2012/5/11-16
- Tomoharu SATO, Takehiro NAGAI, Ichiro KURIKI, Shigeki NAKAUCHI, ”Dissociation of neutral chromatic points for color discrimination and color appearance under incomplete chromatic adaptation”, International Colour Vision Society (ICVS2015, Sendai, Japan), p.89, 2015/7/3-7

国内学会発表

- 佐藤智治, 永井岳大, 中内茂樹, 多色刺激における色検出特性の個人差 CI 法による解析 , 日本視覚学会 2011 年冬季大会, p.70 , 東京 , 2011/1/21-23
- 佐藤智治, 永井岳大, 中内茂樹, 順応色から離れた色分布を持つ多色刺激の検出特性 日本視覚学会 2012 年冬季大会, p.39 , 東京 , 2012/1/19-21

- 佐藤智治, 永井岳大, 中内茂樹, ”色覚メカニズムモデルに基づく色コントラスト知覚特性の逆相関解析”, ヒューマンインフォメーション研究会 (HI), pp.13-16, 沖縄, 2013/12/06-07
- 佐藤智治, 永井岳大, 栗木一郎, 中内茂樹, 不完全色順応における色の見えと色弁別の基準点, 日本視覚学会 2015 年冬季大会, Vol.27, No.1, p.34, 東京, 2015/01/21-23