

博士論文

視野中心部及び近周辺部における 小視野刺激の色の見えとそのモデル化 に関する研究

2022 年 3 月

宇都宮大学大学院工学研究科システム創成工学専攻
茂木 修一

目次

内容	
目次.....	2
第1章 序論.....	5
1.1 小視野周辺視の重要性	5
1.2 色の見え測定の2つの方法	7
1.2.1 エレメンタリーカラーネーミング	8
1.2.2 カテゴリカルカラーネーミング	9
1.3 関連する既往研究.....	12
1.4 2つの手法の結果間の関係	14
1.5 本研究の目的	14
1.6 本研究の概要と構成	15
第2章 実験.....	17
2.1 実験装置	17
2.2 刺激.....	18
2.3 実験手順	20
2.4 被験者	22
第3章 実験結果.....	23
3.1 エレメンタリーカラーネーミングの結果	23
3.2 カテゴリカルカラーネーミング応答の判定基準	27
3.3 カテゴリカルカラーネーミング応答の結果	29
3.4 実験結果の考察	34
3.4.1 実用的な提案(信号灯、安全標識との比較)	34
第4章 考察.....	37
4.1 エレメンタリーカラーネーミングにおける色相とカテゴリカルカラーの関係.....	37
4.2 ユニーク色成分とカテゴリカルカラーの関係.....	39

4.3 周辺視における色の見えの基盤メカニズムとその特性	41
4.4 本章のまとめ	43
第5章 ネットワークモデル	44
5.1 Okajima らのネットワークモデル	45
5.2 Okajima らのネットワークモデルの本研究結果への適用	46
5.2.1 実験結果からモデルへの入力	46
5.2.2 カテゴリカル色応答の導出	48
5.2.3 不定応答の決定方法	53
5.2.4 カテゴリカル色応答 (CCR) の推定	56
第6章 網膜周辺視の錐体分布と周辺視における CCR の不安定性.....	60
6.1 錐体分布から CCR 応答推定までの流れ.....	60
6.2 錐体モザイク	62
6.3 輝度、 r/g 、および y/b 関数	63
6.4 反対色コーディングレベル	66
6.5 カテゴリカル色応答 (CCR) の推定	67
6.6 最新技術による生理学研究との比較	69
第7章 ファインダーへの応用.....	72
7.1 ファインダーの視認性の既往研究	72
7.2 ファインダーへの応用の目的	73
7.3 実験概要	74
7.4 実験装置	74
7.5 実験刺激	75
7.6 実験手順	76
7.7 被験者	77
7.8 正答率の算出方法	78
7.9 輝度影響実験の結果	78
7.10 色影響実験の結果	80

7.11 ファインダーへの応用のまとめ	82
第8章 結論	83
8.1 色の見え測定実験結果のまとめ	83
8.2 ネットワークモデルによる推定のまとめ	83
8.3 ファインダーへの応用のまとめ	85
参考文献	86
謝辞	95
付録	96

第1章 序論

1.1 小視野周辺視の重要性

小視野周辺視の色の見え¹⁻¹⁰⁾とは、周辺視に提示された小さな刺激（特に基準はないが直径が視角で 1° 以下など）がどのような色に見えるか、という問題である。例えば、高速道路や大規模工場の管制室のように多くの人が複数のモニターを使用した作業をする際に、小さなサインが周辺に表示される状況や、自動車運転中に、スマートフォンに代表されるモバイル端末やカーナビゲーションの画面の確認や操作をしながら交通信号灯を認識する状況（50m先の赤信号（黄や青も同じ）の大きさは直径で視角 0.34° ）などに関係する。また、身近な機器ではミラーレス一眼レフ等のファインダーの辺縁部に提示される文字やピクトグラム（視野周辺 $9^\circ \sim 16^\circ$ 付近に視野サイズ 1° 以下での表示が多い）を画面中心の撮影対象を注視しながら検知する状況も考えられる。さらに、近年多様な応用が拡大しているVR (Virtual Reality) やAR (Augmented Reality) では、没入感や現実世界との一体感を重視するために表示装置の広視野角化と高精細化技術が急速に進んでいる⁹⁵⁾。広視野角化は周辺視で見る刺激が多くなることに、高精細化は表示可能な刺激サイズが小さくなることに繋がる。上記のような状況で、周辺視に提示された小視野刺激が何色に見えているのか？というのは応用的側面からみて非常に重要である。

同時に、周辺視での小視野の色の見えを研究することは、中心部と周辺部の網膜における色彩認知メカニズムを解明するという基礎研究という側面からも重要である。人間の網膜はカメラのフィルムや光センサーとは違って、中心部から周辺部に向かって構造が変化しているからである。

人間の網膜中心部はややくぼんでおり、半径が約 2.6° の範囲を中心窩(fovea)と呼ぶ。中心窩のくぼみの一番底の部分半径が約 0.7° の範囲は平になっており、この箇所を中心小窩(foveola)と呼ぶ。中心窩の外側半径約 9.5° の範囲を近周辺部(near periphery)、近周辺部のさらに外側を周辺部(periphery)と呼ぶ⁶⁴⁾。網膜の光受容器としては錐体と桿体と内因性光感受性網膜神経節細胞(ipRGC)があるが、色覚を与えるものは主として明所視で機能する錐体であり、暗所視で機能する桿体の数は多いが色覚には直接的な寄与はない。また内因性光感受性網膜神経節細胞(ipRGC)は環境光のレベル検出への寄与や条件等色への影響が明らかにされつつあるが、視対象となる物体の色の見えへの直接的関与はない。網膜の構造的には、中心窩に最も密集しているのは錐体であるが、周辺になると錐体が減少し桿体が増大する。また中心窩には桿体はほとんど存在しないことがよく知られている⁶²⁾。

色の見えに関する評価手法は様々あるが、代表的な色の見えに関する手法としては後述するエレメンタリーカラーネーミングとカテゴリカルカラーネーミングがある。そしてこれらの手法を用いた小視野もしくは周辺視野に関する研究結果は多数報告されている¹⁻¹⁴⁾。それらの既往研究において共通する結果として、色刺激は、刺激提示の中心からの偏位（視野位置）増大とともに知覚的飽和度（見た目の彩度）が低下し、中心から離れた周辺視野に提示されたときには無彩色(achromatic)に見える場合もあるとの報告もある^{2, 8, 11)}。これらの知覚的飽和度の低下に加え、色刺激の色相は中心からの偏位（視野位置）によって変化し、例えば、赤みがかった刺激と緑がかった刺激が周辺視野において黄色方向へシフトする現象がみられることが、既往研究によって多くの事例が報告がされている^{1, 2, 9-11, 15, 16)}。

刺激サイズも色の見え方に影響を与える重要な要素である。例えば、中心窩では、直径が 20～25' よりも小さい場合、青緑色や紫などの青みを含む色刺激では青みが少なく見えることが知られている。この現象は、小視野トリタノピアと言われているが、中心小窩中心部での S 錐体の欠如により引き起こされることが既往研究によってわかっている¹⁷⁾。また、刺激サイズが減少していく際によく知られている傾向としては、知覚的飽和度の減少がある。例えば、中心窩の条件で刺激サイズの減少に伴い、白色応答の増加または色成分が減少し、低純度の中心窩刺激と合致するという趣旨の報告が既往研究でなされている^{2, 5, 8, 18, 19)}。

そして、刺激サイズと中心からの偏位（視野位置）の複合効果について、いくつかの研究が行われている。例えば、小視野化に伴う飽和度の低下は、中心窩より周辺視でより顕著であることを示した既往研究がある^{2, 5)}。これらの結果は、光受容体の密度の低下と周辺視の桿体と錐体間の相互作用が原因であると考えられている。上記網膜の偏位による色の見えの変化は、既往研究の結果からよく知られているが、それらの多くは水平方向に沿ってのみ実施している^{1-10, 12, 13, 15)}。水平、垂直、または斜めの方向に沿った測定は、いくつかの既往研究で報告されているにすぎない^{11, 14)}。おそらくは、人間の視野が水平方向に長い楕円形であるため²⁰⁾、水平方向に沿った色の見えの変化が他の方向に沿った色の変化よりも重要と考えられてきたからであろう。また、一般的に心理物理学の実験は非常に時間がかかるので、一定期間内に実験を完遂しなければならない場合には、実験条件を水平方向に限定せざるを得ないという事情も考えられる。しかし、例えば、道路標識、公共スペースにあるデジタルサイネージや、冒頭で挙げたマルチディスプレイシステムにおける色の視認性については、垂直方向に沿った研究も水平方向と同様に重要である。

人間の視覚および色知覚特性を含めた照明に関するあらゆる分野の国際基準の制定・国際勧告発行の機関である CIE（国際照明委員会）では、上記の実用的なアプリケーションを考慮し、赤、黄、緑、青の 4 つの固有の色相のカラーゾーンマップに関

するテクニカルレポートを発行した(CIE211、2014)²¹⁾。しかし適用視野サイズは直径約2°で、上述の基礎研究における刺激サイズ減少による彩度低下や色相変化を考慮すると、テクニカルレポートの結果をそのまま小視野に適用するのは難しい。

日常生活では、電子機器のLEDインジケータ、大型ディスプレイやヘッドマウントディスプレイのカラーアイコン、道路や公共スペースのカラーサインや信号など、さまざまな小さな色の刺激にさらされている。しかしながら、さまざまな周辺視野に提示された小視野刺激を使用した色の見えに関するデータを解析することは、色彩設計には必要ではあるが、体系的にまとまったデータは今のところ報告されていない。

1.2 色の見え測定の2つの方法

人間が色の見えを評価する際には微細な色の違いを検出することもできるが、大きくくりに赤や青と判定することもできる。これらの色の見えを評価する際には各々の色知覚特性に対応しているエレメンタリーカラーネーミングとカテゴリカルカラーネーミングという2つの代表的な評価手法がある。ここで、エレメンタリーカラーネーミングではユニーク色成分や無彩色・有彩色成分の連続的な変化を表せるものの、色刺激の特徴を1つのラベルで示す事ができないという不便さがあり、一方、カテゴリカルカラーネーミングでは連続的な変化を表すことはできないという課題がある。これら不便さや課題はあるものの、人間が日常生活をする際には何色に見えるか？といった色を直観的に判定する性質があることを鑑みると、非常に有用な評価方法である。しかしながら、これら2つの評価手法であるエレメンタリーカラーネーミングとカテゴリカルカラーネーミングを同一刺激群に対して、同じ観察条件下で、同一被験者の測定を実施した既往研究は少ない^{9, 31)}。

そのため本研究は、双方の評価方法の課題を補完した研究が重要であると考え、これら2つの評価方法を同時に実験し双方の関係性を解明することにした。また、エレメンタリーカラーネーミングとカテゴリカルカラーネーミングの間で得られる色の見え応答の結果には一定の関係性があり、前者の結果から後者の結果を求める方法、言い換えると色名を推定できるというネットワークモデルがOkajimaらにより提案されている。³¹⁾。ただし、彼らの提案するネットワークモデルは中心視であり、2°視野角のデータに基づくものであり、中心視から周辺視までの視野内のあらゆる領域における小視野刺激にそのネットワークモデルが適用可否の検討はまだなされていない。

1.2.1 エレメンタリーカラーネーミング

表 1-1 は既往研究で行われたエレメンタリーカラーネーミングの手法をまとめたものである。以降では代表例について説明する。1964 年に Boynton ら¹⁾が行った実験では、中心視と周辺視の 2 か所の色の見えをエレメンタリーカラーネーミングによって評価している。評価した視野の位置は水平方向で 0° 、 20° 、 40° の 3 点で、被検者は右目のみで評価を行った。暗黒背景で、テスト刺激の形状は直径 3° の円形、輝度レベルは網膜上の値で 1000td(td はトロランド : Troland という単位で網膜照度を表す値を示す)、刺激の提示時間は 0.3 秒であった。表 1-1 に記載されている図に示す通り 1 つまたは 2 つのユニーク色の応答が許され、1 色の時はそのユニーク色に 3 点、2 色の場合はより強く見える方に 2 点、弱い方に 1 点を割り当て色の見えの変化を定量化した。実験結果は、周辺にいくに従い彩度が減少していき、周辺視では色が知覚されにくくなるという結果が得られた。色相に関しては周辺視にいくに従い、赤よりも黄が大きく、緑よりも青が大きくなる大小関係の傾向を示した。また、周辺視になるに従い、色相がユニーク黄方向、もしくはユニーク青方向へと変化する結果を示した。Gordon & Abramov ら⁴⁾は 1977 年に 5-category method を用いてエレメンタリーカラーネーミングと同様の評価を行った。Gordon & Abramov らの行った研究では、R、Y、G、B の 4 色からなる有彩色成分と無彩色成分を合計で 100 となるように評価する手法が用いられている。Gordon ら²²⁾は 1988 年に 5-category method を改良した (4+1) category method という手法を提案した。そこではまず色相に注目させ、4 つのユニーク色の比率で知覚的な色相を評価させる。次に彩度に注目させ、刺激全体における有彩色成分の比率すなわち知覚的な彩度のパーセンテージを評価させた。また、2002 年の Okajima らの研究³¹⁾は 5-category method とほぼ同じであるが、無彩色成分をさらに白みと黒み成分に分けて回答させた点が特徴である。彼らはこれをエレメンタリーカラーネーミングと呼んだ。2003 年の Sakurai らの研究¹¹⁾では、ディジタイザー上に色相環と知覚的な飽和度の線が描画されており、知覚的な色相は色相環の円周上の位置を指すことにより、知覚的な飽和度は飽和度評価線上の位置を示すことにより評価する手法が用いられた。彼らはこれを “Hue & saturation judgement” と呼んだ。これらの評価手法は、それぞれで別の呼び方が用いられているが、有彩色成分と無彩色成分の比率で知覚的な飽和度を、4 種のユニーク色の比率で知覚的な色相を定量的に評価させている点で本質的に同じである。

表 1-1 様々なカラーネーミング手法

<p>Boynton らの手法 (Boynton et al., 1964)</p>	<p>応答およびポイント割当の例</p> <p>R,Y,G,B,W(AC)から0~2のカテゴリを選択し0~3ポイントを与える</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">(G) G 3 pt.</div> <div style="text-align: center;">(R, Y) R 2 pt. Y 1 pt.</div> <div style="text-align: center;">(B, W) B 1 pt. AC 1 pt.</div> <div style="text-align: center;">(W, R) R 2 pt. AC 2 pt.</div> <div style="text-align: center;">(W) AC 3 pt.</div> </div>
<p>5カテゴリ手法 (Gordonら, 1977)</p>	<p>R,Y,G,B,無彩色成分の5つのカテゴリ応答により合計100のスケールで色の見えを評価</p> <div style="text-align: right;"> <p>100 AC 25 Y 25 R 50 0</p> <p>$R(50) + Y(25) + AC(25) = 100$</p> </div>
<p>4+1カテゴリ手法 (Gordonら, 1988)</p>	<p>ステップ1 R, Y, G, Bの4つのカテゴリから合計100%となるスケールで色相を評価</p> <p>ステップ2 100%のスケールで彩度を評価</p> <div style="text-align: right;"> <p>100% Y 30% R 70% 0%</p> <p>→</p> <p>100% AC 20% S 80% 0%</p> </div>
<p>エレメンタリーカラーネーミング (Okajimaら, 2002)</p>	<p>ステップ1 黒み, 白み, 有彩色成分を合計で10ポイントのスケールで評価</p> <p>ステップ2 R, Y, G, Bから合計で10ポイントのスケールで色相を評価</p> <p>黒み, 白み成分に加え, R, Y, G, Bの色相成分を導出</p> <div style="text-align: right;"> <p>10 pt. BL 2 pt. W 2 pt. C 6 pt. 0 pt.</p> <p>→</p> <p>10 pt. B 3 pt. R 7 pt. 0 pt.</p> <p>→</p> <p>10 pt. BL 2 pt. W 2 pt. B 1.8 pt. R 4.2 pt. 0 pt.</p> </div>
<p>色相と彩度の判定 (Sakuraiら, 2003)</p>	<p>ステップ1 反対色型の色相環の円周上の点をクリックし色相を評価</p> <p>ステップ2 彩度の位置をクリックし彩度を評価</p> <p>色相の比とSからR,Y, G, B からなる固有の色相成分を導出</p> <div style="text-align: right;"> <p>1st R: Y = 0.75 : 0.25 Y G B R B</p> <p>2nd 100% S=60% 0%</p> <p>→</p> <p>10 pt. AC 4 pt. Y 1.5 pt. R 4.5 pt. 0 pt.</p> </div>

1.2.2 カテゴリカルカラーネーミング

カテゴリカルカラーネーミングについて説明する。この手法は予め決められた複数種類の色名を使用して刺激に色名を付ける方法である。Berlin & Kay らが 1969 年に文化人類学的な研究に基づき行われた実験結果が記載された論文が知られている²⁴⁾。この論文では、文化の異なる多くの国々において、多数のカラーチップに単一色名に

よる命名法(monolexemic color naming)で色名を付ける調査を行っており、赤、黄、緑、青を Primary colors と呼び、オレンジ、ピンク、紫、茶色を Secondary colors、白、灰色、黒を Achromatic colors と呼んでいる。多数の実験結果から、これらは成熟した言語に共通して用いられる色名であることが分かり、11 の基本色名としている(図 1-1)。連続的に変化する色の領域からそのような分類がなされたことは、当時の人類学者、言語学者、心理学者から強い関心を集めることとなった。



図 1-1 一般的に使用されている 11 の基本色名

次に、Berlin & Kay らの 1969 年からほぼ 20 年後に、Boynton らが OSA 色票群を用いたカテゴリカル色知覚に関する一連の研究²⁵⁻²⁷⁾を実施し、OSA 色空間における基本色名の範囲やその他のいくつかの特性が明らかにされた。これを契機としてカテゴリカルカラーネーミングは色覚研究者の間で広く注目を集めるようになった。彼らは、基本色名でラベル付けされた色は、olive、peach などの非基本色名でラベル付けされた色と比較して、被験者内での一貫性(Consistency)、被験者間での一致性(Consensus)、早い応答時間(Short response time)を示すことを論じている^{25, 28)}。ここで、被験者内での一貫性(Consistency)とは、異なるセッションでの同一の色票の試行(一般的には2回行う)で、同一色名が使用されたことを指す。例えば図 1-2 の左図の例は、同一の被験者で1回目と2回目とともに「赤」と答えている場合を示し、このことを一貫性(Consistency)があるとした。図 1-2 の右図に示すように、1回目は「ラベンダー」、2回目は「バイオレット」という回答だった場合は、色名も色票も一貫性がないことを示している。



図 1-2 被験者内での安定性 (Consistency)

被験者間での一致性 (Consensus) とは、同じ色票に対して同じ名前が異なる被験者によって使用されている状態のことを示す。例えば図 1-3 の左図の例では、被験者 A では「赤」、被験者 B でも「赤」と答えた場合は色名「赤」とその色票はコンセンサスを示すとした。図 1-3 の右図の例では、被験者 A で「タン(淡い茶色)」、被験者 B で「ページュ」と答えたことを示し、この場合は色名も色票もコンセンサスを示さないとした。



図 1-3 被験者間での一致性 (Consensus)

応答時間の早さ (Short response time) とは色票を提示されてから短時間で「赤」と答えた場合には、応答時間が短いということであり、少し考えてから「ターコイズ」と答えた場合は応答時間が長いことを示す。(図 1-4)。



図 1-4 応答時間 (Short response time)

Boynton らの多面的な研究の後、11 の基本色を用いたカテゴリカルカラーネーミングは、色の見えを測定するツールとしての地位を確立し、色彩を用いた心理物理学実験等学の様々な研究に適用されるようになった²⁹⁻³⁶⁾。これとは別に、さまざまな言

語、文化における色の知覚や色の名前の特性との比較にスポットを当てて、11 基本色に限定しないカラーネーミング研究も多数行われることとなった³⁷⁻⁴⁰⁾。また、そのような研究では、色彩学や心理物理学だけでなく言語学や比較文化学の幅広い知識が必要になってくることが広く知られることとなった。

1.3 関連する既往研究

CIE のテクニカルレポートでは、カラーゾーンマップは視野全体をカバーする等高線マップとして定義され、特定の刺激で知覚される赤み、黄色み、緑、青みの強さが、中心からの偏位に応じて、または、視野の中心から視野周辺になるにつれてどのように変化するかを示している。これらの色の知覚される強さは UHC(unique hue component)と呼ばれている。以下に、周辺視小視野の既往研究の結果について、もしくは視野における色の見えに関する研究内容について説明する。

Weitzman ら(1969)は²⁾刺激サイズは小視野で中心窩と 5° と 10° の周辺視を測定している。刺激の提示時間は 20ms と 200ms という短時間で、刺激サイズは直径 $11'$ 、 $21'$ という小視野であった。各刺激は 15sec から 20sec おきに提示され、被験者には色の見えを、赤、緑、青、黄、白のいずれかを強い順に 2 つまで応答させるカラーネーミング法によって評価させた。その結果被験者は波長が $570\mu\text{m}$ と $575\mu\text{m}$ では黄緑色よりも白として報告されることが多く報告された。また、小視野および応答時間が短くなるにつれて緑と黄色応答が減少し白の応答が増加した。また 5° と 10° の周辺視では小視野および応答時間が短くなるにつれて青緑と緑黄色間の応答が白に変化した。一方長波長側および短波長側の応答は比較的变化せず青色の応答が得られた。

矢野ら(1989)¹⁸⁾はテスト刺激 $3'$ 、 $8'$ 、 $30'$ で、テスト刺激の種類を 21 色として、視野角が 1° の参照刺激の RGB 原色比を調整することによりテスト刺激と等色させる手法を用いて、色の見えに対する刺激サイズの影響を測定した。テスト刺激と参照刺激の間には $3'$ 、 $6'$ 、 $12'$ のギャップがある条件で実験している。被験者は 2 名で CRT モニターは型番 SONY PVM1371Q を使用した。ギャップと背景は黒を使用し、両眼で、自由視で実験を行った。実験の結果、テスト刺激のサイズによる色の見えの変化はテスト刺激のサイズが $3'$ 、 $8'$ 、 $30'$ の結果で比較すると $30'$ 、 $8'$ 、 $3'$ と小さくなるにつれて彩度の低下する方向に色の見えが変化する結果が得られた。また、テスト刺激の色相によって低下の割合は変化し、青色系統は著しく変化し、赤、緑系統は被験者によってはほとんど変化しない結果が報告されている。

また、テスト刺激のサイズによる色弁別の変化は視野の大きさが $8'$ 視野の大きさが $3'$ の結果を比較すると $3'$ の結果の方が弁別の結果が悪化し、yellow/blue 方向に悪化する傾向がみられた。さらには、青色順応時の視野の大きさによる色の見えは全

被験者において色の見えの変化は補色というよりもむしろ赤色方向に変化する傾向がみられた。また、各被験者間で非常に異なる結果が得られたことが報告されている。

高松ら(2001)¹⁹⁾は、CRT カラーモニタを使用し、黒色の背景で円形刺激を用い、刺激光を中心視野と周辺視野に提示させた実験を行っている。また、評価はカラーネーミング法を用いた。視野サイズは 60'、24'、12'、6.0'、5.0'、4.0'、3.5'、3.0'、2.5'、2.0'、1.4' であり、中心窩と周辺視は 3°、6° で行った。テスト刺激の色は赤、黄、緑、青、緑、青を用いており、右眼を使用した。なお、実験はすべて暗室で行った。また、被験者は色覚正常者 3 名で行った。実験の結果は視角が小さくなるに従い有彩色成分の割合が低下し、無彩色成分の割合が増加することを定量的に示し、この傾向が視角 10' 以下にて顕著に表れることを示した。これらは小視野第 3 色覚異常現象が考えられることを示し、視角と色相変化の関係を示している。また、テスト刺激が赤の場合には、極小視野においては赤味成分の割合が上昇し、緑青では極小視野においては、次第に検知困難となり応答比率が 5 割の方向にシフトし緑と青の次第に困難になっていくことを示した。

Knau らは(2002)⁴¹⁾は 58 名(男性 28 名、女性 30 名、18~83 歳)の健常者を被験者とした。被験者は Bailey-LovieEyeChart#4 でテストした結果、視力が 20 もしくは 30 以上ある人々である。また、刺激は 560nm と 20-25Hz の HFP(Hetero-chromatic Flicker Photometry)で 2.6 log troland に設定した。テスト刺激のサイズは直径 0.5° で背景光はなしである。テスト刺激は 4 波長(480nm、505nm、577nm、650nm)で、刺激サイズは、直径が 0.0096°、0.019°、0.041°、0.063°、0.11°、0.14°、0.25°、0.5°、0.96° の 9 種類のサイズであった。刺激の提示時間は 2 秒間である。提示位置は視野の右側方向 2.5° と 6° であった。各実験セッションにおいて評価開始前に暗順応を 8 分を行った。被験者には、無彩色を 0% として、色成分の知覚的比率を応答させた。生データに対して逆三角関数を使用した補正を用いている。さらに、実験の結果は、刺激サイズの依存性があり結果を Naka-Rushton equation で近似している。また、Abramov らの critical perceptive-field と実験結果を比較しており、完全には合致しないものの比較可能なレベルであった。また、小視野での年齢効果は有意であることを示した。

以上数多くの研究がなされているが、小視野刺激を用いての中心窩を含む周辺視での色の見えを多方向について調べた研究はほとんどない。

1.4 2つの手法の結果間の関係

Okajima ら³¹⁾は、色の見えを測定する2つの方法を用いた実験結果に基づき、エレメンタリーカラーネーミングとカテゴリカルカラーネーミングの関係についてシンプルかつ独創的なネットワークモデルを提案している。彼らが提唱したネットワークモデルは、色覚メカニズムの中間段階で反対色過程におけるニューラルコーディングの出力結果からカテゴリカルカラーネーミングの推定を行っている。しかしながら、この研究以降、それら2つの関係に関する報告はほとんどされていない。また、Okajima ら³¹⁾は、色度図の広い領域をカバーする78のテスト刺激を使用した。実験で行ったテスト刺激は中心窩でかつ刺激サイズが 2° でのみ実験が行われた。一方、Sakurai ら¹¹⁾は、視野全体で65箇所のテスト刺激の実験を行ったが、テスト刺激の直径が 1.85° であり5色のテスト刺激でしか実験を行わなかった。すなわち、小視野刺激を用いてエレメンタリーカラーネーミングとカテゴリカルカラーネーミングを用いた2つの方法で得られた結果と、視野の水平方向、垂直方向の多方向での周辺視野を用いた色の見えの変化の関係を調査した研究はいまだに行われていない。

1.5 本研究の目的

本研究の目的は以下に述べる2つである。1つ目の目的はエレメンタリーカラーネーミングとカテゴリカルカラーネーミングを用いて、視野内の様々な場所に提示された小視野刺激の色の見えを調査し、実用的な観点でのカラーデザインに役立つ基礎的知見を提供することである。2つ目の目的はエレメンタリーカラーネーミングとカテゴリカルカラーネーミングの2つの方法間での関係が刺激の提示場所により変化するかどうかを明らかにすることである。そのために、視野内の異なる位置で得られた結果をOkajima らによるネットワークモデルで近似し、2つのカラーネーミング間の関係性を共通の変数でどの程度説明できるのかを検証する。さらに不均一な分布を示すことが知られている網膜の錐体配置のモデルを用いて、視野中心と視野周辺に提示された刺激に対する錐体応答およびその次段階の反対色過程の応答を推定し、前述のネットワークモデルからカテゴリカルカラーネーミング応答を導出する。固視の変動と周辺網膜における錐体不均一性、すなわち色覚プロセスの末端レベルでの構造が、高次メカニズムでの応答であるカテゴリカルカラーネーミングの周辺視における不安定性の一因となりうるのかを検討することである。

1.6 本研究の概要と構成

本論文は8章構成である。各章の概要を以下に記載する。

第1章は序論である。周辺視における色の見えに関する小視野もしくは周辺視野に関する既往研究を概括し、小視野かつ周辺視で多方向にて観察した結果についてまとめた研究が少ないことを述べた。さらにエレメンタリーカラーネーミング応答とカテゴリカルカラーネーミング応答の関係について既往研究での提案モデルはあるが、小視野かつ周辺視に適用された研究報告はないことを記述している。の結果を用いて解析した研さらに、これらを背景としての本研究の目的、すなわち視野中心と視野周辺に提示された小視野刺激の色の見えに関する体系的な実験を行い、既往モデルによる検証を行うこと、色覚メカニズムに基づいたカテゴリカルカラーネーミング応答の推定について述べている。

第2章～第4章にかけては、周辺視提示小視野の色の見え実験とその結果を詳述している。

第2章では、使用した実験装置、刺激、背景、各種条件、本研究で用いた色の見えの評価方法について詳細内容を記載し、エレメンタリーカラーネーミング、黒み白み評価、カテゴリカルカラーネーミングの具体的な実験手順、被験者の概要、実験条件を述べている。

第3章は実験によって得られた被験者3人分のエレメンタリーカラーネーミングの評価結果である色度と彩度の評価結果、黒み白み評価の結果、カテゴリカルカラーネーミング評価の結果を示し、考察している。

第4章ではエレメンタリーカラーネーミングにおける色相とカテゴリカルカラーネーミングの関係やユニーク色成分とカテゴリカルカラーの関係、周辺視における色の見えの基盤メカニズムとその特性について第3章によって得られた実験結果より考察している。

第5章では第3章で得られたカテゴリカルカラーネーミング評価とエレメンタリーカラーネーミングの実験データに、Okajima ら³¹⁾が提唱したネットワークモデルを適用・検討した結果について述べている。そして、ネットワークモデルを用いて推定した結果と第3章で述べたカテゴリカルカラーネーミングの実験結果との一致率を求め、その結果について考察している。

第6章では、第3章でのカテゴリカルカラーネーミング結果が中心視では安定しており、周辺視では不安定になる原因の一端を、網膜における錐体分布の不均一性と固視の不安定性と仮定し、それらの要因で推定できるのかについて検討している。錐体モデルは網膜中心と網膜周辺に相当するL、M、S錐体分布のモデルを生理学的データによって得られた知見を基に構築し、次段階としてL、M、S錐体の分光感度の線形関

数を用いた輝度、r/g、y/b チャンネルを推定し、5 色 (R、G、B、DaY、BrY) の色刺激に対応する 3 チャンネルの出力値を算出している。そして、網膜周辺の錐体分布と周辺視で見たときのカテゴリカル色応答 (CCR) の不安定性を、Okajima らによるネットワークモデルである程度説明できる推定結果について述べている。

第 7 章では、応用例としてミラーレス一眼レフ等に搭載されているファインダーを使用した場合に画像周辺部に表示された文字表示を想定した文字の視認性に関する実験結果とその考察について述べている。実験で行った装置は行った実験では文字の表示場所を上左、上中央、上右、下中央、下左の計 6 か所としている。行った実験は 2 種類で、輝度影響実験では文字の輝度は 5cd/m^2 、 10cd/m^2 、 30cd/m^2 、 160cd/m^2 の 4 種類、背景画像は cat、coffee、cheese の 3 種類で行っている。色影響実験の実験では、文字の色は白、黄、緑、赤の 4 種類を使用した。背景画像は白 (coffee)、黄 (pine)、緑 (leaf)、赤 (berry)、多色 (beans) の 5 種類で行っている。

第 8 章は、本研究の結論として全体のまとめと本研究全体を総括した。

第2章 実験

2.1 実験装置

本研究の実験装置について説明する。図 2-1 は測定装置の側面からみた図を示している。この図において、本実験装置は暗幕で覆われており、ブース内に設置された半球の後方に置かれた LCD(液晶ディスプレイ)を使用した。メーカー名は富士通で型番は VL-1530SW を使用した。この LCD を用いて半球の中心における刺激窓からテスト刺激を呈示した。テスト刺激は直径 120cm の大きな半球の中心にある小さな穴を通して、被験者に提示した。また、固視点として小さな赤いシールを半球内部に貼り、被験者が固視点を移動することにより視野周辺までの刺激を呈示する方式を採用した。たとえば、視野右 5° を測定する場合は、左 5° の固視点を注視してもらい測定した。テスト刺激のサイズは直径 0.51° の円を使用し、刺激の色、持続時間、および提示の順序は、パーソナルコンピュータ(PC)によって制御されたものを使用した。また、この研究で用いている用語のうち、「eccentricity」は、中心からの偏位を示し、網膜の位置と反対の視野に提示された刺激の提示位置とする。また、本実験の測定は、上下、左右方向における 3 つの中心からの偏位 5° 、 10° 、 20° で行い、さらに 0° を含めた計 13 箇所を採用した。半球の内側には、球の縁と被験者の間に配置された 2 つの疑似的な D65 蛍光灯(メーカー名：東芝株式会社、型番：FL20SD-EDL-D65)で照らされた灰色面で約 N5.5 に設定した。

図 2-1 は、被験者がよく見えるようにするため左側のランプのみを表示した。ランプホルダーは、図 2-1 には記載されていないが被験者の直射日光を回避するため薄い長方形の黒板を遮光板として光源に取り付けた。そして、灰色の表面をできるだけ均一に照らそうとしたが、内部の輝度は実測した結果 25cd/m^2 から 60cd/m^2 (水平方向で中心からの偏位約 30° の範囲内にあった。また、完全なガンツフェルト実験(被験者を夢見状態と同様に感覚遮断を実現する実験手法の一つで被験者の全視野を均一にするために被験者を安静な状態にしておく手法を示す)ではないものの、被験者の視野のほとんどが灰色になるように設定した。そして、半球中心にあるテスト刺激の周囲は同じ輝度レベルを維持するように設定した。また、中央付近の 8 カ所の輝度は $30.0 \sim 37.7\text{cd/m}^2$ の範囲内にあり、平均輝度は 33cd/m^2 であった。被験者の右側に配置したディジタイザーは、色相と知覚的飽和度の位置の判定を行い、応答結果を入力するためのポインティングデバイスとして使用した。前述したディジタイザーは、色相環(hue circle)と知覚的飽和度の位置(saturation evaluation line)を描いた紙をはがれないようにしっかりと貼り付けたものを使用し、色相環と知覚的飽和度の位置は、図 2-1 に

示したものを使用した。そして、分光放射計(型番:Photo Research、PR705)を使い、テスト刺激の輝度と色度、および半球内周囲の灰色の場所を測定した。

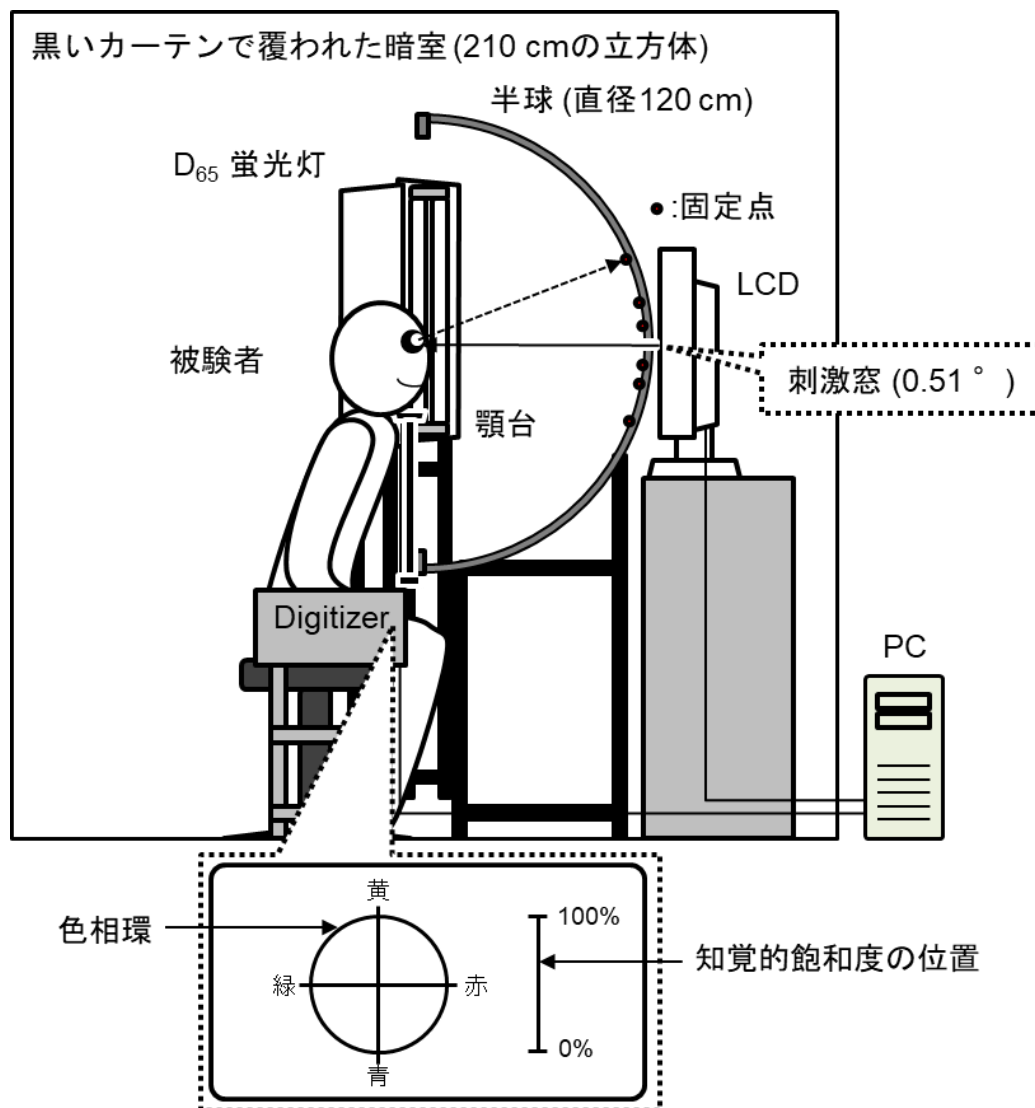


図 2-1. 装置の概略図

2.2 刺激

本実験で用いたテスト刺激は、直径 0.51° の円を用いた。この刺激サイズは、中心窩のトリタノピック領域(中心窩の中央付近はS錐体(錐体の中で青色系を中心に検知することが出来る細胞)が存在しないことから極小視野下では青系統の判断がしにくくなる領域)よりも大きく設定し、 1° 未満で、中心窩で 1° をカバーする刺激と同等の色応答を維持することが出来るように選択した^{19, 41)}。このテスト刺激のサイズは、

例えば 34m の距離で直径 50cm の信号機、または 60cm の距離で 5mm の物体を見たときの状況に対応している。なお、図 2-2 は、テスト刺激の色を色度図で示している。(a) は 20cd/m^2 での R、DaY、G、B 刺激を示し、(b) は 60cd/m^2 での BrY 刺激及び Sakurai ら¹¹⁾ で使用された刺激を記入している。また、このテスト刺激の色は赤みがかった色の領域、黄色がかった色の領域、緑がかった色の領域、青みがかった色の領域のそれぞれにおいていくつかの刺激を選択している。そして、それぞれを R1～R10、DaY1～DaY9、G1～G11、B1～B13 の名称を与え、それぞれの刺激の輝度は 20cd/m^2 に設定した。また、テスト刺激の名称のうち DaY は濃い黄色を示す色の領域であったが、これらのテスト刺激は典型的な黄色の色見ではなかったため、 60cd/m^2 の明るい黄色のテスト刺激 (BrY1～BrY12) を追加した。

我々の研究の目的の 1 つは、周辺視でみたときの赤、黄、緑、または青の命名法を保持する色刺激を特定することであるが、R グループと B グループの間に欠落している領域が存在している。これらは我々が行った事前の実験によって、欠落領域に色度を持つほとんどの刺激は、カテゴリカルカラーネーミングの結果紫やピンクなどの二次基本色として名前が付けられることがわかった。R および B グループの刺激のいくつかもカテゴリカルカラーネーミングの結果はピンクと紫と名付けられることがわかった。そのため、ピンクと紫の刺激はこれ以上必要ないと考え、R グループと B グループの間に欠落している領域の刺激は省略されている。

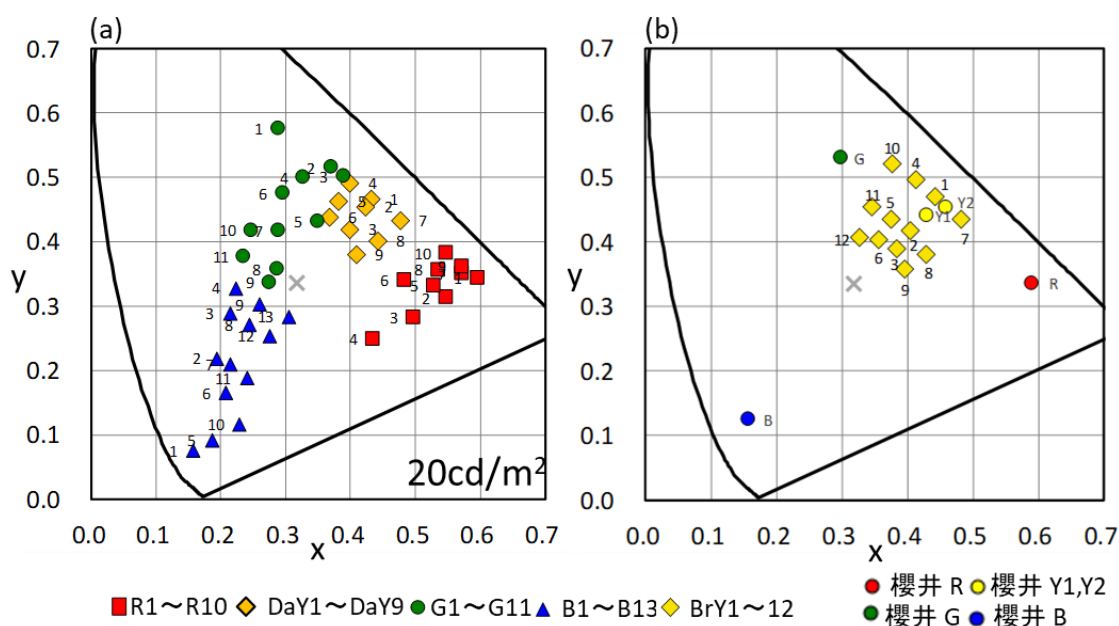


図 2-2. テスト刺激の色度図

2.3 実験手順

次に実験手順について説明する。図 2-3 に示すように最初に、被験者は半球の前に座り、顎当てを使用して刺激を観察した。次に測定は常に右目を用いて行い、顎当ての高さは、円形の穴の中心と仮想球の中心を結ぶ線上にそれぞれの被験者の目が配置されるように逐次調整を行った。また、各実験のセッションの前に、被験者は半球内の照明条件に適応する時間を 3 分間設定した。被験者は実験者が示した注視点の 1 つに視線を向けた後、テスト刺激を 1 秒間提示している。次に、被験者は、刺激の色の見え方に対して、エレメンタリーカラーネーミングを用いて色相と知覚的飽和度の位置の判定を行い、黒みと白みの評価、カテゴリカルカラーネーミングを順に被験者に回答させた。また、この実験では、被験者の視線を検知する装置が実装されていなかったため、被験者に、正しい位置に視線を移動しているかどうかを宣言させた。そして視線の移動失敗した場合は判定をやり直すように指示した。また色相と知覚的飽和度の位置(もしくは彩度)の判定には、以下に記載するポインティング手法を使用した。図 2-1 に示すように、ディジタイザーには、反対色理論に基づく色相環と知覚的飽和度の位置が表示されており、被験者は、カーソルを使用し、自分が感じた知覚に対応するディジタイザー上の位置をクリックするように指示されている。たとえば、被験者の知覚が非常に飽和した赤みがかった黄色である場合は、被験者は $R(0^\circ)$ と $Y(90^\circ)$ の間の円周上のある点と、100%の位置に近い垂直線上のある点をクリックするように指示がなされている。この手法の利点は、被験者の色相と知覚的飽和度の位置(もしくは彩度)の連続的な知覚を、ある程度離散的な比率もしくはパーセンテージなどの数値に変換されることを回避するために実施している。



図 2-3 実験手順

次に、エレメンタリーカラーネーミングの判定結果の1例について説明する。図2-4の図のような刺激が表示された場合、これは被験者の知覚が非常に飽和した赤みがあった黄色とした。このとき、被験者はR(0°)とY(90°)の間の円周上のある点と、100%の位置に近い垂直線上のある点をクリックすることとなり、グラフで示すと図2-4の図の形になる。ここでは、入力値に対して、ユニークイエローコンポーネント(unique yellow component または UYC)、ユニークレッドコンポーネント(unique red component または URC)の具体的な計算結果を示す。例えばUYCは $72 \times 0.33 = 24\%$ となり。URCが $72 \times 0.67 = 48\%$ という結果になる。ここでユニークとは、人間の基本的な色感覚である赤、黄、緑、青のことを意味している。

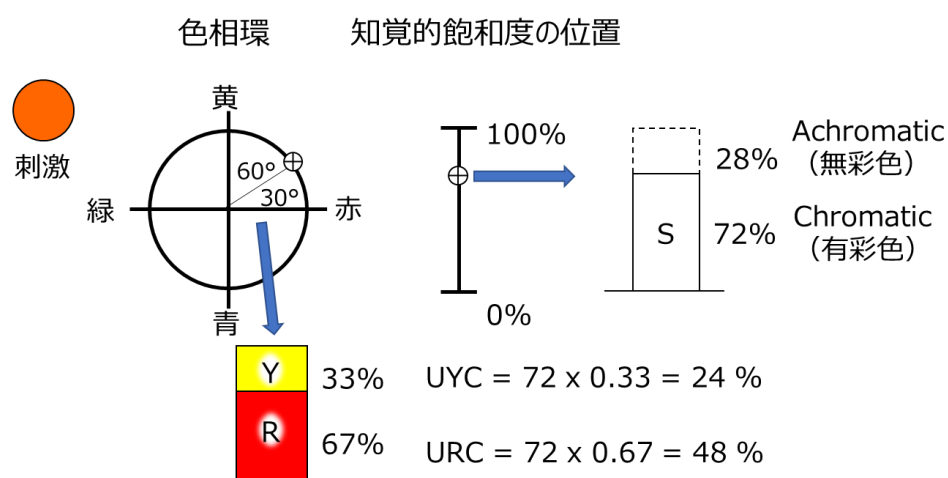


図 2-4 色相環と知覚的飽和度の判定例

次に、黒み白み評価は、(白みがまったくない状態、もしくは黒みが全くない状態、言い換えると刺激に白か黒のどちらか一つの色成分のみがあるように見える状態)から4(完全に白または黒)までの5つのランクを用いたスケーリング手法が採用された。

たとえば、被験者が刺激に黒みを感じず、中程度の白み被験者が感じた場合、黒みおよび白みの評価スコアはそれぞれ0および2になる。また、黒でも白でもない場合は、両方のスコアは0になる可能性があるが、両方のスコアが4になることはできないこととした。いいかえると、これは完全に黒と白が同時に発生していることを意味している。これは、被験者が黒と白の相対量を直接評価することは非常に困難であったことから、この方法を採用することにした。これはたとえば、明るいオレンジ色の刺激を被験者がみた場合に、知覚される比率を推定して答えさせるよりも、黒みは弱いがゼロではないため1であり、白みは強いいため3であると答えさせた方が簡単に答えることが出来たためである。また、カテゴリカルカラーネーミングは、11の基本色

名のみを使用する制約のある方法を採用している。そして、被験者は、この11の基本色名のうちの1つだけを使用し、テスト刺激の色に名前を付けるように指示されている。また、被験者が周辺視で刺激が見えなかった場合は、見えない(not seen)と定義した。この見えないという結果は、他のエレメンタリーカラーネーミングや白み黒み評価の結果に対して応答がなかったことを意味している。また、被験者に対して実験の最初に、色相環と適切な一連のカラーチップを使用し、色相、知覚的飽和度の位置(もしくは彩度)、白み、および黒色度の概念を被験者に説明している。

また、それらを実験前に一通り説明したが、被験者が評価しなければならないものに対し理解し難い状況に陥ることはなかった。各被験者はそれぞれ、各実験において13のテスト場所で55のテスト刺激それぞれに対して5つの試行を順次繰り返し行い、各被験者は合計で3575回の試行を完了した。1つのセッションには、ランダムに選択されたテスト刺激と場所で構成される55の試行が含まれ、被験者ごとに65のセッションが行われた。すべての被験者のデータ収集前に、約20回の試行で構成される練習セッションが実行された。そして、この練習セッションは、1回のセッションが完了するまでに約30～40分かかり、同じ被験者に対して、1日に最大2回のセッションが実行された。さらには、休憩は1時間以上取得するように設定した。

2.4 被験者

本実験の被験者は20代前半の3名であった。そのため、以降3人の被験者のイニシャル名を用いAK、KF、KHと記載することにした。また、3名のうち1人は女性、2人は男性であり、大学院生と学部生であった。すべての被験者は無色である通常の眼鏡を使用していた。また、Farnsworth-Munsell 100 Hue Testを行い、すべての被験者が正常な色覚を持っていることを確認した。被験者のAKとKFは心理物理学の実験が初めてであり、KHは心理物理学の実験があった。

第3章 実験結果

3.1 エレメンタリーカラーネーミングの結果

次にエレメンタリーカラーネーミングの結果を示す。図 3-1 は左側に色相環、右側に知覚的飽和度の位置に関する概念図を示し、図 3-2(また、詳細な内容は付録図 3-2A に記載する)は垂直方向での被験者 AK、KF、KH の R1、B1、G1、BrY1 刺激の色相および彩度の判定の結果を示している。図 3-2 に記載された縦棒は、各被験者の 5 回繰り返しの最大標準誤差を示している。横軸は中心からの偏位を示し、それぞれの視野位置に提示された刺激を示す。図 3-2(a)～(h)は、3 人の被験者の視野の垂直方向で R1、B1、G1、BrY1 の色相と知覚的飽和度の測定結果を図示しており、横軸は中心からの偏位で単位は度(°)である。また図に示されている負と正の符号は、それぞれ視野の下側と上側方向に対応しており、縦軸は図 3-2(a) (c) (e) (g)は、図 3-1 内に記載されている、垂直に引き伸ばされた色相環(Hue circle based on opponent color theory)の円周上の位置を示している。図 3-2(b) (d) (f) (h)の縦軸は、知覚的飽和度の値で最大値を 100 としたときのパーセンテージ(%)で示している。また、図の中の点は、見えない応答が 2 回得られた視野の上側方向の 20° での被験者 AK と KF からのデータを除いた状態での、5 回試行時の平均値を示している。従って、見えない応答が 2 回あった場合は 3 回の応答の平均値がプロットされている。また、縦方向のバーは、各被験者の 5 回の有効な繰り返しの最大標準誤差を示している。これらの応答は、R1、B1、G1、BrY1 刺激に対し比較的安定した結果となっており、本研究にて測定を行ったすべての偏移角に対するすべての被験者の色相(hue)の標準誤差の平均値は R1、G1 が 4.7° と 4.9° であり、知覚的飽和度の標準誤差は R1、B1 でそれぞれ 5.3%と 5.7%であった。また、図に示すように、被験者 AK は HF や KF よりも低い値が一貫して割り当てられていているため、絶対値は異なるが、3 人の被験者の知覚的飽和度評価の結果は同様の傾向を示した。また、知覚的飽和度の値は 0° で最も高く、ピークが視野の上側の 5° に現れた被験者 AK の B1 を除き、ほとんどの場合、中心からの偏位の増大に伴い減少している。そして、多重比較とそれに続き一元配置分散分析での結果は、B1 の 5° と 0° での結果に有意差がないことを示した($p=1.0000$)が、そして、中心からの偏位は有意な影響を及ぼすことを示した($p=0.00002$)。3 人の被験者の色相の判定結果も、R1 では視野が周辺にいくに従い色相が黄色にシフトし、B1 では色相が変化しないという同様の傾向を示した。また、中心からの偏位が 20° の R1 の場合、被験者は KF で、視野の上側方向で、平均の色相の値は 137.2° で、UYC と UYG の間の色相環上の位置に対応している。また、同じ場所で、被験者 KH に関しては知覚的飽和度の応答の 4 つの値がゼロ(0)であった。これは、無彩色のケースと残りの値は見えないことを意味

し、これらの事例では色相に関する応答は発生しなかったことを意味し、この被験者の場合、R1 の色成分がほぼフェードアウトしていたことを示している。また、スペースを節約するために、黄色 (DaY1) のデータは表示されていないものの、図 3-2 (b) と (d) に示されているものと同様の知覚的飽和度の低下がすべての被験者の色刺激、かつ原色の値で観察された。さらに、G1 は 3 人の被験者で黄色への色相のシフトが観察されたが、DaY1 と BrY1 では有意な色相のシフトは観察されなかった。これらの特性は、冒頭で引用したように、網膜周辺の色見えに関する既往研究で報告されたものと一致する結果を示した。また、すべてのテスト刺激について同様のグラフが得られたが、それらのほとんどは 0° で飽和度がピークに達したが、図 3-2 に示す知覚的飽和度の結果ほど明確な結果とはならなかった。

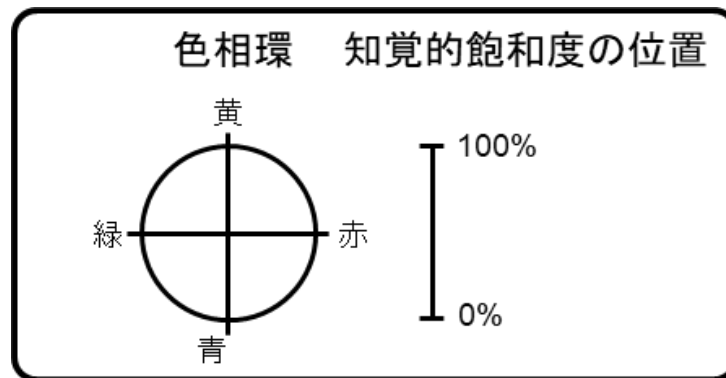


図 3-1. 色相環と知覚的飽和度を示す図

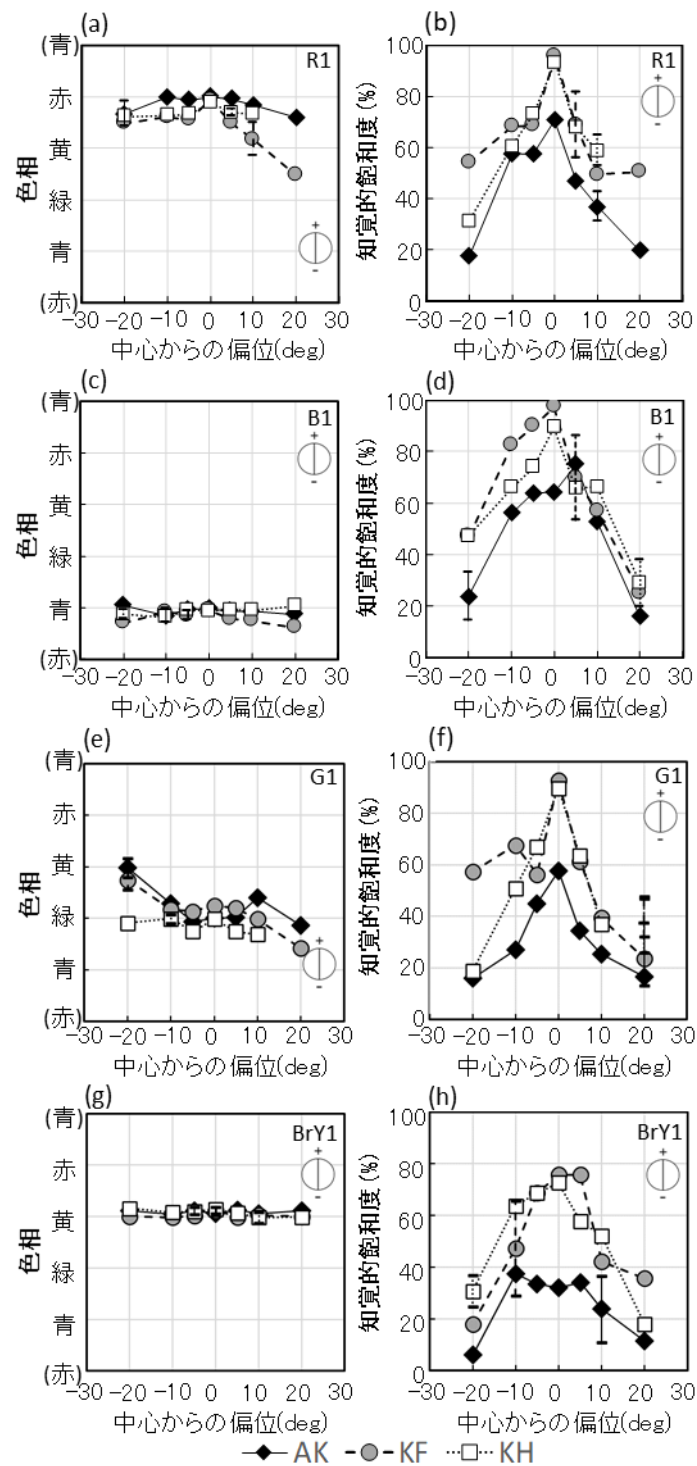


図 3-2. 垂直方向の被験者 AK、KF、KH の R1、B1、G1、BrY1 刺激の色相と彩度の判定の結果。

図 3-3(a)～(f)は、異なる刺激サイズ間での色相と知覚的飽和度の位置の判定結果を図示している。(a) (d)は色相(Hue)、(b) (c) (e) (f)は知覚的飽和度の位置の結果を示している。また、(a) (b) (c)はともに水平方向の結果を示し、(d) (e) (f)は垂直方向の結果を示している。また、横軸は中心からの偏位で単位は度($^{\circ}$)である。また図に示されている負と正の符号は、それぞれ垂直方向は視野の下側と上側方向に対応し、水平方向は鼻側、耳側方向を示し、縦軸は図 3-3(a) (d)は、色相環の円周の上の位置を示している。R1、DaY1、BrY1、G1、B1 は視野角 0.5° を使用した本研究での 3 人の被験者の平均値の結果を示し、黒線(実線、破線、点線、鎖線)は 1.85° の刺激を使用した結果で Sakurai らの結果を示している。

小視野刺激時かつ周辺視でみたときの色の見えの急峻な変化を調べるために、本研究の結果を、直径 1.85° の刺激を使用している Sakurai ら¹¹⁾によって報告された結果と比較した。そうしたところ、R1、DaY1、G1、B1、BrY1 刺激の色度は、櫻井らによって報告された R、Y1、G、B、および Y2 刺激の色度に非常に近い結果を示していることがわかった。図 3-3(b)に示すように、輝度に関しても同様の結果を示した。ここで、図 3-3 の色の記号は、本研究での 3 人の被験者の平均値(視野角が 0.5°)を表している。また、黒い線(実線、破線、点線、および鎖線)は、Sakurai ら¹¹⁾の 10 人の被験者の平均値を表す(視野角は 1.85° の時の値を示す)。図 3-3(a)、(d)に示すように、本研究では R1 と G1 で色相が黄色にシフトしていることがわかった。また、色相のシフトはより低い中心からの偏位から開始し、中心からの偏位が 20° でのシフト量は既往研究の結果よりも大きい値を示した。また、この研究における 0° でのすべての刺激の値は、既往研究の結果よりも低い傾向を示し、中心窩での知覚的飽和度に対するサイズによる影響を示した結果となった。また、図 3-3 で示されているように、すべての色で小視野刺激での、中心からの偏位による知覚的飽和度の急激な減少がみられた。

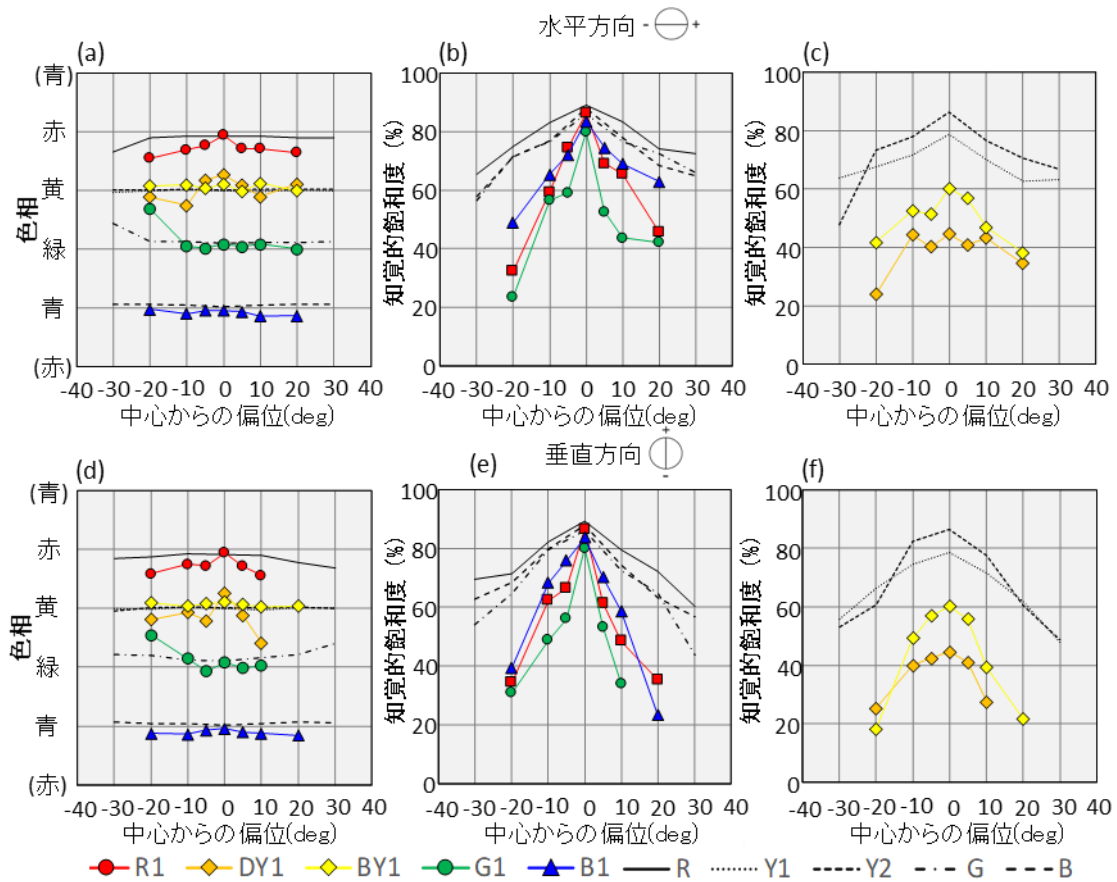


図 3-3. 異なる刺激サイズ間での色相と知覚的飽和度の判定結果の比較。

3.2 カテゴリカルカラーネーミング応答の判定基準

図 3-4 は中心からの偏位が 0° (中心窩)でのカテゴリカルカラーネーミングの結果を示している。(また、詳細な内容は付録内図 3-4A に記載する) (a)は3人の被験者が同じ応答をした際の結果を示している(100% consensus)。(b)は少なくとも2人の被験者が同じ応答をした際の結果を示している(67% consensus)。そして、各被験者の各刺激のカテゴリカル色応答は、以下のように設定している。まず、被験者が5回繰り返した後、同じ色の名前または「見えない」と3回以上応答した場合は、その場所でその被験者の刺激に同じ色を3回以上答えた色の名前、または「見えない」と判定した。その他の場合、たとえば、2つの黄色、2つのオレンジ、および1つの赤と応答した場合は「不定」(もしくは undefined)と判定した。また、色名が割り当てられている場合は、各場所においてその被験者の代表的な色名を割り当てている。

これらのルールに基づき、各被験者の判定結果は、上下左右及び中心窩のすべての場所で、代表的な色、不定、または見えないのいずれかを判定した。図 3-4(a)は、3 人の被験者の代表的な色名のうち 3 人の被験者の判定結果が一致していることを意味する 100%一致(consensus)の色名を表している。図 3-4(b)は、少なくとも 2 人の被験者の代表的な色名が一致していることを示す 67%以上一致の色名を表している。図 3-4(a)に示すように、色覚特性が正常でかつ同じ年齢であり、同じような学歴を持つ被験者は、比較的飽和した色刺激に対して同様のカテゴリカルカラーネーミングを使用する傾向を示した。また、100%一致の 27 のテスト刺激のうち、20 の刺激が赤、黄、緑、青の原色の中の 1 つが選択されたことから、これらの色名の一致率が高いことを示唆している。また 100%一致した結果だった数少ないのテスト刺激とは対照的に、55 のテスト刺激はすべて中心からの偏位が 0° で 67%以上一致の基準に合格している。また、3 人の被験者の結果は、一般的な傾向では互いに一致しているが、異なるカテゴリの色または飽和度の低い刺激の境界付近でいくつかの個人差があることがわかった。また、15 回の応答すなわち、3 人の被験者 \times 5 回の繰り返しのうち 8 回以上発生したカテゴリ別の色応答を導き出して、図 3-4(b)に示したものと比較した。

結果として、図 3-4(b)と異なる点は、DaY5 ($(x, y)=(0.38, 0.46)$)と G8 ($(x, y)=(0.29, 0.36)$)の 2 つのテスト刺激のみであることがわかった。前者は新しい基準(すなわち、3 人の被験者 \times 5 回の繰り返しのうち 8 回以上発生したカテゴリ別の色応答)を使用して緑になったが、図 3-4(b)では黄色と表示され、後者の G8 は緑になったが、図 3-4(b)では青と表示された。他の 53 の刺激のカテゴリカルカラーネーミングの結果は図 3-4(b)のものと同一であった。2 つの異なる基準によって得られたこのような高度な一致は、中心からの偏位が 0° でのカテゴリカルカラーネーミングの結果の信頼性と安定性を示している。ただし、後者の基準(すなわち、3 人の被験者 \times 5 回の繰り返しのうち 8 回以上発生したカテゴリ別の色応答)は、1 人の被験者の傾向に影響される可能性があるため、問題がある。たとえば、一部の赤みがあった青の刺激では、被験者 A が紫に 5 回応答し、被験者 B が紫に 1 回応答し、被験者 C が 2 回応答した場合、色名紫が刺激に割り当てられることとなる。そして被験者 B と C の代表的な色名ではない。この観点から、少なくとも 2 人の被験者の代表的な色名の基準、つまり 67%以上一致を採用することとした。また、視野の上側方向の 20° では、7 つの BrY 刺激は、100%一致が得られた場合にのみ存続した。この基準に基づくと、1 人の被験者の代表的な色の名前が全方向に 20° のほとんどの B 刺激で紫であったため、B 刺激(B1 から B13)はいずれも合致しなかった。100%一致の基準は、 0 から 20° へのカテゴリのカラーネーミングの段階的な変化を示すには厳しすぎると考えた。以上が、67%一致の基準を採用したもう 1 つの理由である。以下に示す図 B(図 3-4 詳細

版) (a)～(z)は、67%以上一致の中心、及び上下左右方向での中心からの偏位 0° 、 5° 、 10° の結果を示している。

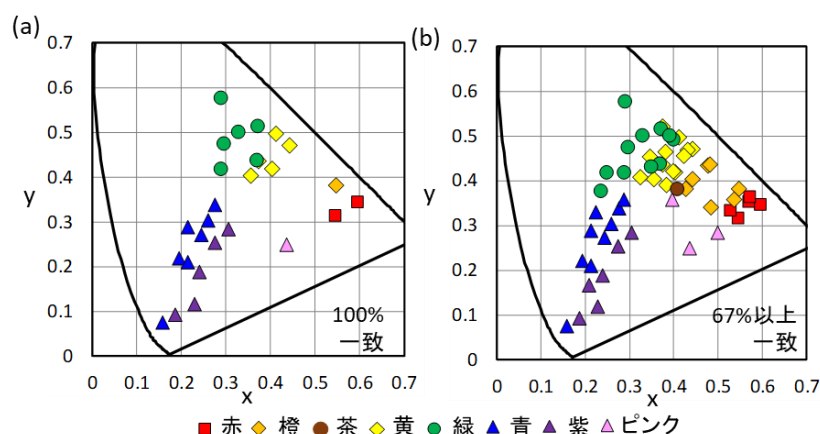


図 3-4. 0 度でのカテゴリカルカラーネーミングの結果

3.3 カテゴリカルカラーネーミング応答の結果

図 3-5 は 3 人の被験者間で 67%以上一致のカテゴリカルカラー応答の結果を示している。図 3-5 (a)～(c)は視野の耳側方向、図 3-5 (d)～(f)は上側方向、図 3-5 (g)～(i)は鼻側方向(Nasal field)、図 3-5 (j)～(k)は下側方向を示す。上段、中段、下段に記載されているの数字は、中心からの偏位（視野位置） 5° 、 10° 、 20° を示している。表 3-1 は、カテゴリカルカラーネーミングにおける 100%一致、67%以上一致、不一致(non consensus)、不定(undefined)、見えない(not seen)応答の数を示している。また、この図では、不定と見えないを黒で示しており、それぞれ円と x マークが表示されている。図 3-5 内の不定は、少なくとも 2 人の被験者の反応が不定になった場合であり、2 人以上の被験者のカラーネーミングに矛盾があることを示している。一方、被験者間の違いも多く見られる結果となった。3 人の被験者から 3 つの異なる応答が得られた場合を不一致として、図 3-4 に十字マークで表記した。結果としては、図 3-5(a)および(d) (g) (i) の 5° では、カテゴリカル色応答は 0° の場合とほとんど同じであるが、3 人の被験者による異なる代表的な色に起因するいくつかの不一致のポイントが見つかる(オレンジ、茶色、黄色)、例えば視野の上側方向の DaY8((x, y)=(0.44, 0.40))の場合等である。図 3-5 (b) (e) (h) (j) の 10° では、いくつかの刺激は不定または不一致のいずれかを示しているが、多くの刺激は 0° の刺激と同じ色名を保持し、視野の上側方向の 10° での不定と応答した数から 6 であった

(図 3-5(e)参照)。また、他の方向の同じ中心からの偏位で見られる応答結果と比較しても著しく多い結果となっている(表 3-1 を参照)。これは、カテゴリカルカラーネーミングの不安定性が視野の上側方向では 10° から始まり、その方向の 20° でのカテゴリカルカラーネーミングの応答の劇的な減少が予見されることを示している。また、 20° で見られる不一致応答は、G8(灰色、不定、見えない)など、1人以上の被験者の不定または見えないのいずれかを含んでいるか、代表的な色名が1つも一致していない状態を示している。また、図 3-5(f)の $(x, y) = (0.29, 0.36)$ は、被験者内の不整合と低い検出可能性を反映している。色名の持続性は視野の耳側方向で最も高く(図 3-5(c)を参照)、赤を除く7つの色名が取得され、これらは主に黄色、緑、青であった。有彩色の色名の減少は視野の上側方向で最も顕著な傾向を示しており(図 3-5(f)を参照)、BrY、B 刺激では黄色と青の応答のみが得られた。また、7つの刺激が見えないであるということは、このみえない刺激の場所に提示された刺激の検出性が著しく強く低下していることを示している。図 3-5(f)に示すように、見えない応答は主に R、DaY 刺激で観察される。これは、末梢網膜の長波長領域におけるスペクトル感度の急激な低下に関連している可能性がある⁴²⁻⁴⁵⁾。表 3-1 に、不一致、不定、見えないの8色の色名で67%以上一致を得た刺激の数を示す。水平方向の 20° で視野の鼻側方向の不一致および不定の応答は、視野の鼻側方向で提示される刺激のカラーネーミング能力の大幅な低下を示し、視野の耳側よりも多くなることがわかった。視野の鼻側の非対称性へのこの傾向は、瀬川らによって発見された周辺のカテゴリカルカラーネーミングに関する既往研究の結果と一致する傾向を示した³⁰⁾。ただし既往研究の結果では、このような色名の劇的な減少は、視野の鼻側と耳側方向それぞれで中心からの偏位が 60° と 90° で現れていた。この現象の違いはおそらく、本研究で使用した刺激よりも大きな刺激サイズと高い輝度(直径 4° で約 120cd/m^2)によるものであったためと考えられる。また、多くの研究では、視野の鼻側方向の網膜よりも視野の耳側の網膜の色覚の強い低下が報告されている。そして、カテゴリカルカラーネーミングにおける上下非対称性の結果に直接的に関連する研究結果は今のところ報告されていない。また、視野の下側方向より視野の上側方向の方が深刻な劣化は、図 3-3(f)に示す飽和低下傾向と一致している。カテゴリカルカラーネーミングを使用した既往研究の数に対して、CIE1931 (x, y) 色度図にプロットされたデータを示したのは Okajima ら³¹⁾による研究等ごくわずかしかなかった²⁹⁻³¹⁾。また、既往研究は黒、白と黒の中間(ミディアムホワイト)、および明るい白で囲われている11の基本色名を使用しており、2人の被験者の中心窩でのカテゴリカルカラーネーミングの結果が示されている。それらの刺激のスペクトル成分は、マクスウェル視光学系を使用していることと、それらの刺激が赤(645.2nm)、緑(526.3nm)、青(444.4nm)の3つの単色光で構成されていたことから、この研究のものとは完全に異なっている。ただし、それらの刺激の直径、網膜照

度、持続時間は、我々の研究で使用されたものと同等の条件であった。彼らの研究における黄色、緑、青、紫、ピンクの領域は、黒とミディアムホワイトで囲まれており、 0° のカテゴリカルカラーネーミングの結果に対応する領域と多少重なっている。そのため、実験条件と被験者の違いを考慮すると、2つの研究間で一致する現象は、色度図上のカテゴリカラー領域の安定性を示している。図 3-5 の結果は、直径 0.5° の刺激のカラーネーミング特性が、既往研究で直径 2° の刺激で得られたものとほぼ同じであることを示した³¹⁾。したがって、カテゴリカルカラーネーミングの特性は、すべての方向で 5° で同レベルに保たれており、 10° で軽度に劣化する傾向を示し、 20° でひどく劣化した結果となっていた。特に、視野の上側方向に提示された刺激で顕著に劣化する傾向を示した。

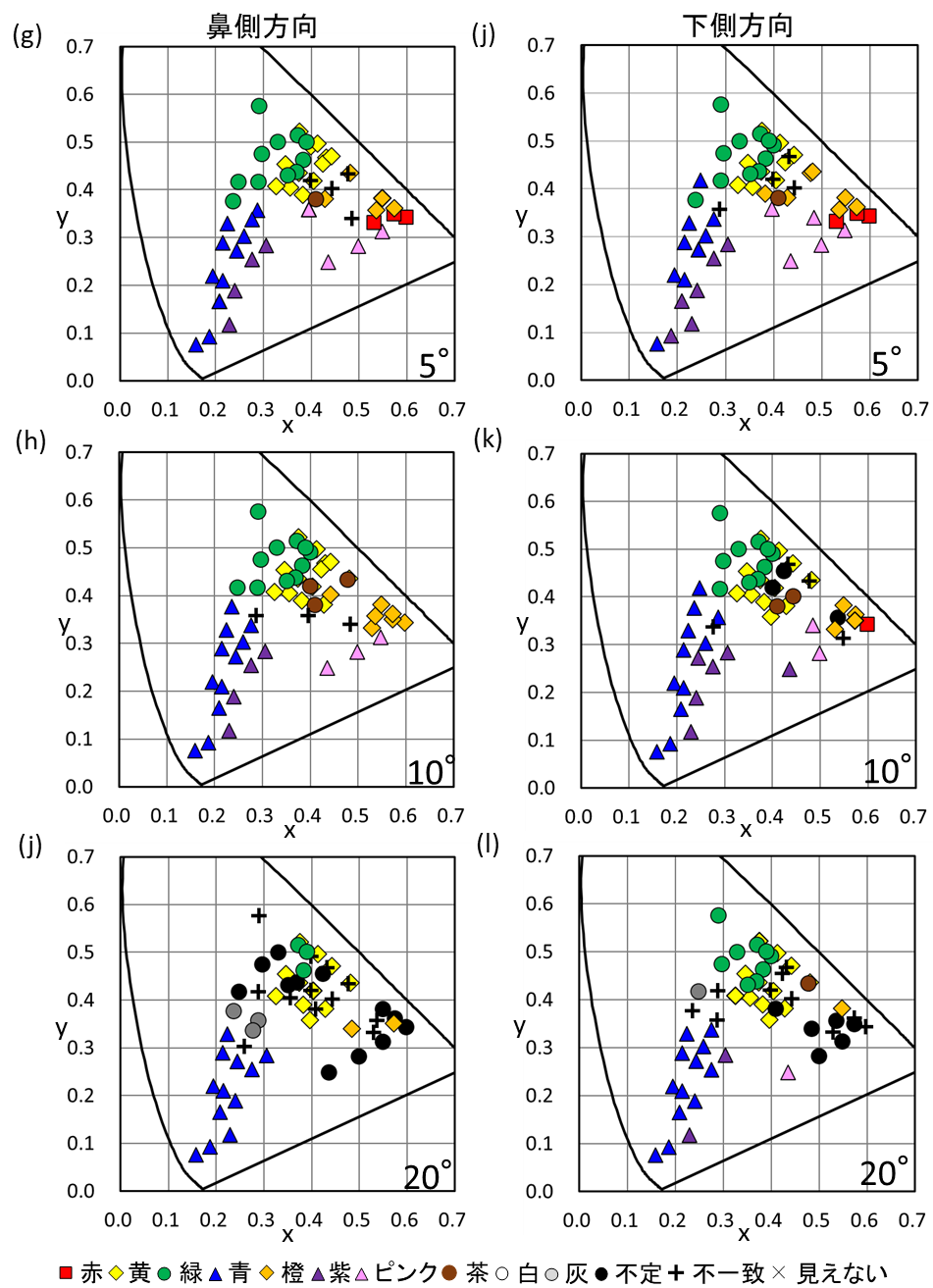


図 3-5. 3 人の被験者間で 67% consensus のカテゴリカルカラー応答の結果

表 3-1. カテゴリカルカラーネーミングにおける
100% 一致、67% 一致、不一致、不定、見えない応答の数

	鼻側方向			中心	右側方向		
度(°)	-20	-10	-5	0	5	10	20
100% 一致	13	28	30	27	34	28	18
67% 一致	18	24	21	28	17	20	21
不一致	12	3	4	-	4	4	10
不定	12	-	-	-	-	3	6
見えない	-	-	-	-	-	-	-
	下側方向			中心	上側方向		
度(°)	-20	-10	-5	0	5	10	20
100% 一致	13	33	31	27	34	23	7
67% 一致	18	13	22	28	16	22	11
不一致	8	8	2	-	5	4	5
不定	16	1	-	-	-	6	15
見えない	-	-	-	-	-	-	17

3.4 実験結果の考察

3.4.1 実用的な提案(信号灯、安全標識との比較)

図 3-6(a)、(b)は、3 人の被験者で中心からの偏位（視野位置）0°、10°、20° で同じカテゴリカルカラーネーミングを回答したテスト刺激を示している。図 3-5(b)は、光信号の赤、黄、緑、青の色領域(実線)46, 47)と安全標識の対象色(点線)48)を示している。図に記載されている記号、黄(Yellow)、緑(Green)、青(Blue)、橙(Orange)紫(Purple)、桃(Pink)はそれぞれ 10° および 20° の範囲内で上下左右の 4 方向すべてにおいて 0° のものと同じカテゴリカルカラーネーミングを回答した刺激を示している。そして、同じ回答をすることができたほとんどの色は主要な基本色であった。

また、テスト刺激の意味は赤みがかった色の領域、黄色がかった色の領域、緑がかった色の領域、青みがかった色の領域のそれぞれにおいていくつかの刺激を選択しており、R1~R10、DaY1~DaY9、G1~G11、B1~B13 とし、それぞれの刺激の輝度は 20cd/m² の場合と、60cd/m² の明るい黄色のテスト刺激 (BrY1~BrY12) の設定をしている。

また、赤は 5° の R5 刺激に対してのみ回答をしているため、図 3-6 には示されていない。R 刺激も G 刺激も 20° ゾーンでは同じ回答をすることが出来なかったが逆に、7 つの BrY 刺激と 2 つの B 刺激は、この範囲でそれぞれ同じ色名で黄色と青の同じ回答をしている。これは、後述する、赤緑の反対色メカニズムが黄青の反対色メカニズムよりも中心窩に近い網膜周辺でより悪化するという色覚仮説と一致している。図 3-6(b) の実線と点線は、後で説明する信号灯と安全標識の色領域を示している。

本研究では、信号、標識、またはインジケーターのカラーデザインに役立つだけでなく、視野内のさまざまな場所に提示された小視野刺激の色の見えのデータを提供している。図 3-6(b) には、光信号の赤、黄、緑、青の色領域(実線)^{46, 47)}と安全標識の対象色(点線)⁴⁸⁾が描かれている。より正確には、実線は、赤、黄、緑の道路交通灯の色の色度領域⁴⁷⁾と、青の光信号の色の推奨される一般的な境界⁴⁶⁾を示している。点線は、通常の方法、リン光材料、および外部照明下での電源 off 時の内部照明の安全標識の表示の色を示している⁴⁸⁾。また、図 3-6(b) の大文字はエリアの色を示している。

一般的に、赤色はその典型的な使用法や、赤色そのものの意味が停止や危険という意味として用いられているため最も重要である。したがって赤色領域はスペクトル軌跡の長波長端に近い狭い領域に制限される。しかしながら、我々の研究におけるすべての赤みがかかった光は、光信号の狭い赤の領域の外側にあるが、R グループの中で最も飽和している R1 は、物体の色の赤色領域にほとんど含まれていない。色度が $(x, y) = (0.58, 0.34)$ 、 $\lambda_d = 606\text{nm}$ 、 $pe = 83\%$ (ここで Pe は、刺激純度を示し白色点から外周までの直線距離に対する白色点からその色度点までの距離の比を示す) の R1 でさえ、 5° のゾーンが赤の色名で 0° と同じ回答をしていない。これは、刺激サイズが 0.5° 未満で、 10° を超える周辺視で時折見る場合は赤の記号に使用される刺激、 pe が 83% を超える赤の領域で選択する必要があることを示している。光信号と表示の色の黄色領域は、黄色という名前の領域から外れている。また、黄色領域の色刺激は、我々の結果ではオレンジと名付けられている。

黄、赤色の領域と明確に区別するために、近年では、黄色の領域はわずかに緑がかかった領域にシフトし、日本工業規格の BrY グループの領域に近づいている⁴⁹⁾。規格の改訂は非常に困難を極めていた。なぜならば、光信号とオブジェクトカラーの両方の黄色の領域にいくつかの変更が必要になり、sRGB のような色域ディスプレイを使用しているため、緑の刺激はどちらの緑の領域にも含まれていないからである。

我々の結果では、G グループの刺激のほとんどは 10° ゾーンで緑と安定して名付けられているが、色度の $(x, y) = (0.29, 0.58)$ 、 $\lambda_d = 545\text{nm}$ 、 $pe = 63\%$ の G グループで最も飽和した色である G1 は、 20° で黄色に向かって大きな色相シフトする傾向を示した。視野の鼻側方向と視野の下側方向(図 3-3(a) と (d))、および視野の上側方向の検出性が悪い(図 3-3(d) と (e))。輝度の増加に応じた緑から黄色への色相シフトも図 3-6(a) に見られ、G グループの 3 点がいくつかの BrY 刺激と重なっている。それらは、 20cd/m^2 で

安定して緑と名付けられるが、 60cd/m^2 で黄色と名付けられる。GグループとBrYグループの境界領域の色刺激は、緑または黄色のインジケータには使用しない方がよく、 20° ゾーンで生き残ったBグループのうち2つは、信号灯と物体の色の青色領域と重なり、これらの色領域が周辺で時折見られる小刺激のサイズに適していることを示唆している。ただし、ここで注目に値するのは、 20° ゾーンでのBrY、B刺激の存続は、必ずしも黄色と青が信号、標識、またはインジケータに適した色であることを意味するわけではないということである。例えば、黄色の刺激は一般に知覚的飽和度が低いため(図3-3(c)および(f))、目立ちにくくなるだけでなく青色の光が目には散乱し、解像度が低くなる。したがって、周辺視野に提示された小信号、標識、もしくはインジケータの色を決定するためには、実際の現場の状況を見たうえで色設計の目的に合うように慎重に検討する必要がある。

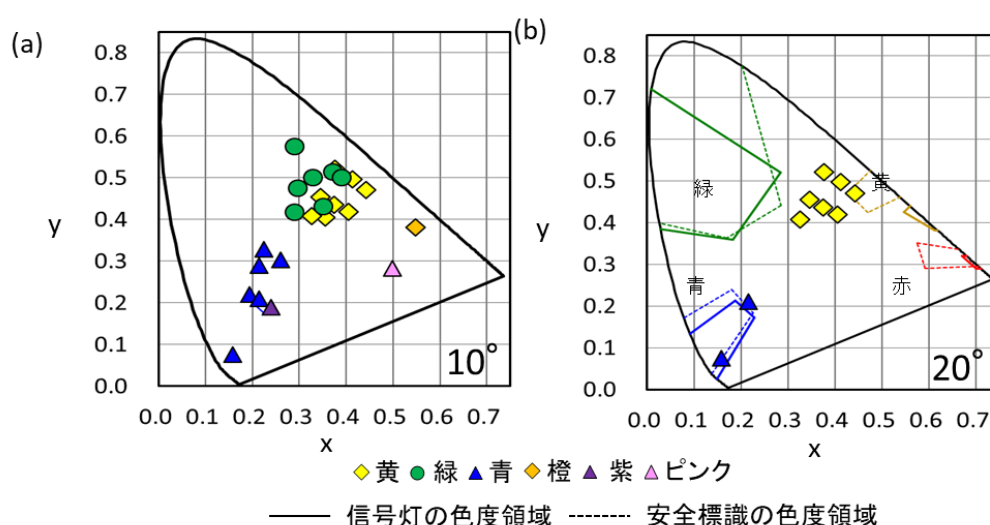


図 3-6. 3 人の被験者で中心からの偏位（視野位置） 0° 、 5° 、 10° 、 20° で同じカテゴリカルカラーネーミングを回答したテスト刺激。

第4章 考察

4.1 エレメンタリーカラーネーミングにおける色相とカテゴリカルカラーの関係

図 4-1 (a)～(m) は、視野の視野上側方向、下側方向、耳側方向、鼻側方向に 0° 、 10° 、 20° それぞれの結果の関係を示している。図にプロットされている各点は、極座標図の位置 ($\theta, s/100$) の 2 軸の座標を示している。ここで、 θ と s は、色相と知覚的飽和度の判定で応答されたそれぞれ単位が度 ($^\circ$) の色相角と単位がパーセンテージ (%) の知覚的飽和度を表している。外側の円は 100% の飽和度を示している。(a) 0° (b)～(d) は視野下側、(e)～(g) は視野上側、(h)～(j) は鼻側方向、(k)～(m) は耳側方向での結果を示し、中心からの偏位（視野位置）は上から順に 5° 、 10° 、 20° 順で記載している。

記号は、個々の被験者がカテゴリカルカラーネーミングに使用する色の名前を表している。例えば、図 4-1 (a) の赤い四角は、色名赤に対する 3 人の被験者からのすべての応答を示しているが、的外れの値を回避するために、1 つの色名のポイント数が 10 より大きい場合には、色相角の 10～90percentile のポイントの 80% がプロットされている。たとえば、 0° では 58 個の赤い正方形でプロットされている。また、色相角は $1^\circ \sim 17^\circ$ の範囲で、中央値は 0.7° で、 $-29.2^\circ \sim 33.2^\circ$ の範囲の色相角で分布した 73 個の応答結果から選択がなされている。これらの操作は、図にプロットされている各点の分布を狭めてはいるが、 20° の場所で時折見られる的外れな応答を取り除くのに役立つ。この図を、反対色面での「カラーマッピング」と呼ぶことにする。そして、 0° では、8 つの基本色名の領域は、通常、赤からオレンジ、黄色、緑、青、紫、ピンクの順に並べられている。また、茶色の領域はオレンジの領域と重なっている。また、赤いプロットは、主に第 1 象限の水平方向に沿ってその近くの領域に分布している。黄色のプロットは、Y 軸に沿ってほぼ対称的に分布している。黄色のプロットの色相角の中央値は 90.5° で、緑の色相角の中央値は 167.0° で、黄色に向かっていくらか重みが付けられている。青のプロットは B の縦軸の周りに分布しているが、色相角の中央値が 259.2° の緑に向かってわずかに偏っている。紫のプロットは、色相角の中央値が 305.1° である第 4 象限に分布しており、B 軸と R 軸の中間から B 軸に近くなっている。4 つの原色の色名領域は明確に区別されているが、二次色の色名領域は紫以外の他の色名領域と重なっている。たとえば、茶色はオレンジ領域と重なり、ピンクは赤領域と部分的に重なっている。また、ピンクは、知覚的飽和度の低い赤と

オレンジをカバーする領域だけではなく、紫と赤の間の飽和領域でも得られる現象がみられていることはとても興味深い。また、オレンジと茶色のポイントの知覚的飽和度、黒み、白みの応答を確認したところ、オレンジの知覚的飽和度と黒みの平均値は茶色のプロットよりも小さいことがわかっている。ただし、これは統計的には重要ではない。なぜならばスチューデントの t 検定を用いると、白みの平均は茶色の点よりもオレンジの点の方が大幅に大きくなるからである ($p=0.033$)。0° の結果は(図 4-1(a)を参照)、Okajima ら³¹⁾で示されたカラーマッピングとよく一致しているが、紫の領域は広く、ピンクの領域は本研究の実験結果よりも狭くなっている。Okajima らはまた、色の黒みの平面でオレンジと茶色の分離を示し、オレンジはより色が濃く、黒っぽさが少なくなり、茶色はその逆になっている。この結果は本研究の実験結果と完全には一致していないが、矛盾もない。また、図 4-1(m)では、8つの基本色名領域は基本的に 0° と 20° で同じままであるが、各領域は半径方向に沿ってある程度縮小し、色名領域の縮小は、図 4-1(g)に示すように、特に1番目と4番目の紫、ピンク、赤、オレンジ、茶色の領域で、視野の上側、横軸が R の象限で顕著な結果であった。また、ピンクと赤にはそれぞれ1ポイントと2ポイントしか残っていない結果となり、1つの赤い点の位置は的外れの結果に見えるが、それらは生データに基づいてプロットされていた。また、ピンクを除き、すべての色名領域の色相角度の中央値はほぼ一定のままであった。ピンクの色相角の中央値は、基本的に赤の色相角と重なる(すべての中心からの偏位で 0 から約 10° の範囲内)が、視野の垂直方向と水平方向の両方に沿って -10° ~ 0° の領域でわずかに紫にシフトしているが、この理由は不明である。中央値の角度が一定であることは、エレメンタリーカラーネーミング法による色相の判定結果からカテゴリカルカラーネーミングへの変換の過程が、この研究で調べた視野内の場所での刺激に対してほぼ不変であることを示しているが、色の領域の縮小は知覚的飽和度の判定の減少を反映している。

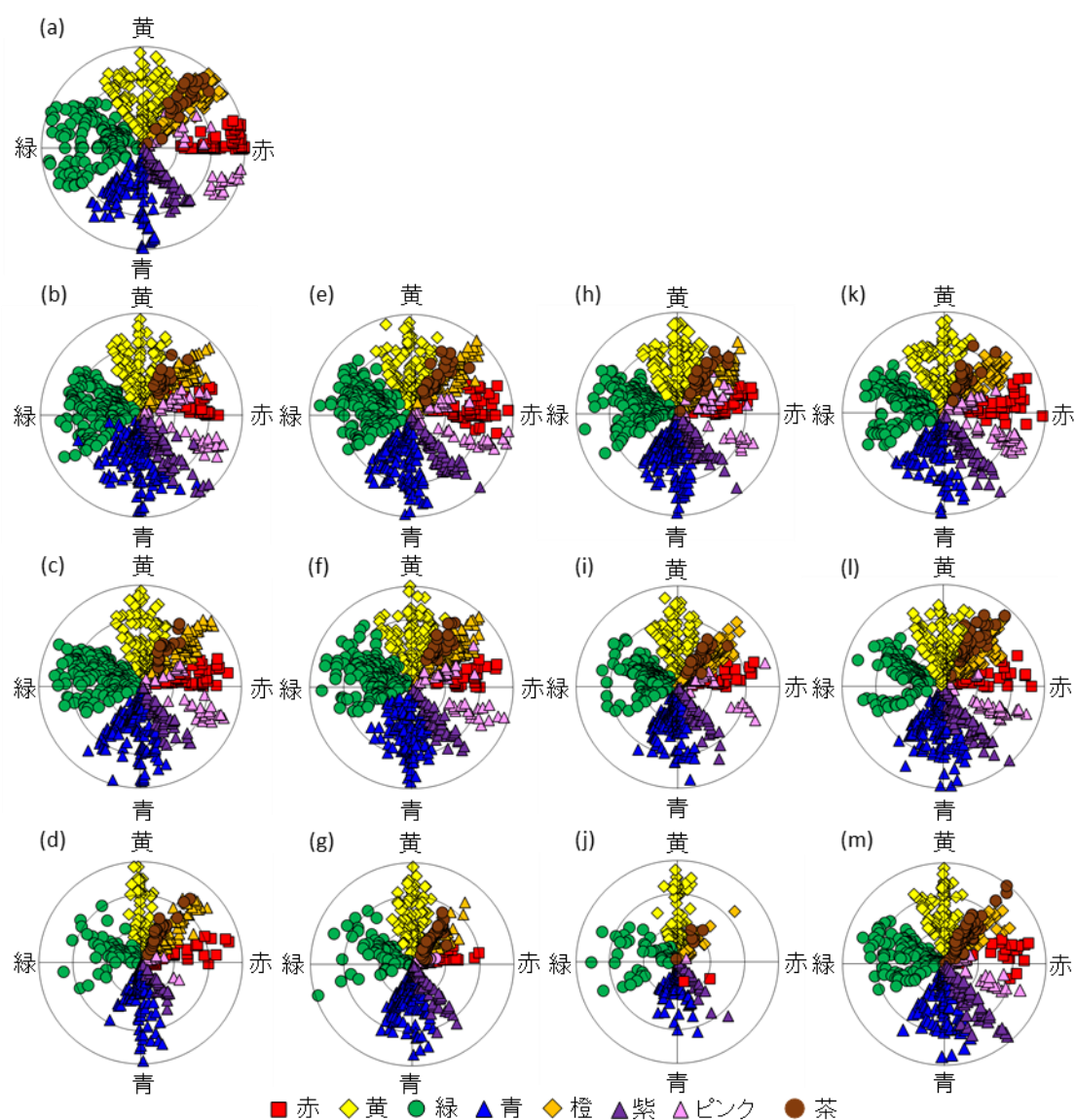


図 4-1. 色相と知覚的飽和度の応答およびカテゴリカルカラーネーミングの関係図

4.2 ユニーク色成分とカテゴリカルカラーの関係

本研究ではさらに、対応する Primary color names を引き出すために必要な赤、黄、緑、青の UHC(unique hue component)の値を計算して、色や中心からの偏位によって変化するかどうかを調べている。

ここでは UHC は、色相と知覚的飽和度の判定結果から得られた色相の比率の積として定義することとした。また、この UHC は、Abramov et al⁵⁰⁾によって導入された均一外観図(uniform appearance diagram :UAD)の%red metric と同じもののことを示

す。このAbramovの研究では、色相のパーセンテージ(%)は次のように定義されている。2つの直交する一意の色相軸からの円弧上の逆数の長さは、2つの色相の知覚比率と見なすこととしている。例えば、色相環のR軸からの被験者の応答の色相角が θ° ($0 \leq \theta < 90$)の場合、赤と黄色の知覚比は $(90 - \theta) : \theta$ となる。次に、飽和応答が $s\%$ の場合、URC(Unique Red Componentの略)とUYC(Unique Yellow Componentの略)は、それぞれ式(1)と(2)によって導かれている。

$$\text{URC} = s \cdot \frac{(90 - \theta)}{90} \quad (1)$$

$$\text{UYC} = s \cdot \frac{\theta}{90} \quad (2)$$

ここで、図4-2は、視野の水平方向で鼻側方向から耳側方向に沿った赤、黄、緑、青の結果を示す。各色名には、平均値、中央値、10 percentile 値、および90 percentile 値が示されている。

図4-2に示すように、色名が黄、緑、青をそれぞれ割り当てるために必要なUYC(Unique Yellow Componentの略)、UGC(Unique Green componentの略)、UBC(Unique Blue componentの略)である。ここで10 percentile 値は、中心からの偏位が増大しても大きく変化しない。逆に、赤の曲線は他の3つの色名とは大きく異なり、赤の命名の基準は 0° で非常に高くなり、 0° でより高い値と鋭いピークを示した。また、視野の垂直方向で上側から下側方向に向かってすべての色で同様の結果が得られた。また、赤は、白と黒に続く11の基本色の用語の中でも最初に登場する色であり²⁴⁾、人間により最も区別することが容易な色である。本研究におけるカラーネーミングの過程では、 0° で赤を割り当てるために大量の赤み成分が必要となっているが、中心からの偏位に応じて赤みの成分は減少している。

ここではReaとFreyssinierによる演色性研究を参照するとより興味深い結果が得られるかもしれない⁵¹⁾。ReaとFreyssinierらは、どの色の物体がさまざまな照明条件下で各シーンでの何が自然な色見と鮮やかさに最も強く影響するかを調査し、赤が暖かい照明条件と冷たい照明条件の両方で“手に負えない、最高の色相(hands down, the top hue)”であることを発見している。そしてカテゴリカルカラーネーミングで赤と名付けられた色みは、視覚環境の全色情報を識別するのに特定の役割を果たしている可能性があり、特に高精度の認識のために中央視野で高度に飽和している必要がある。

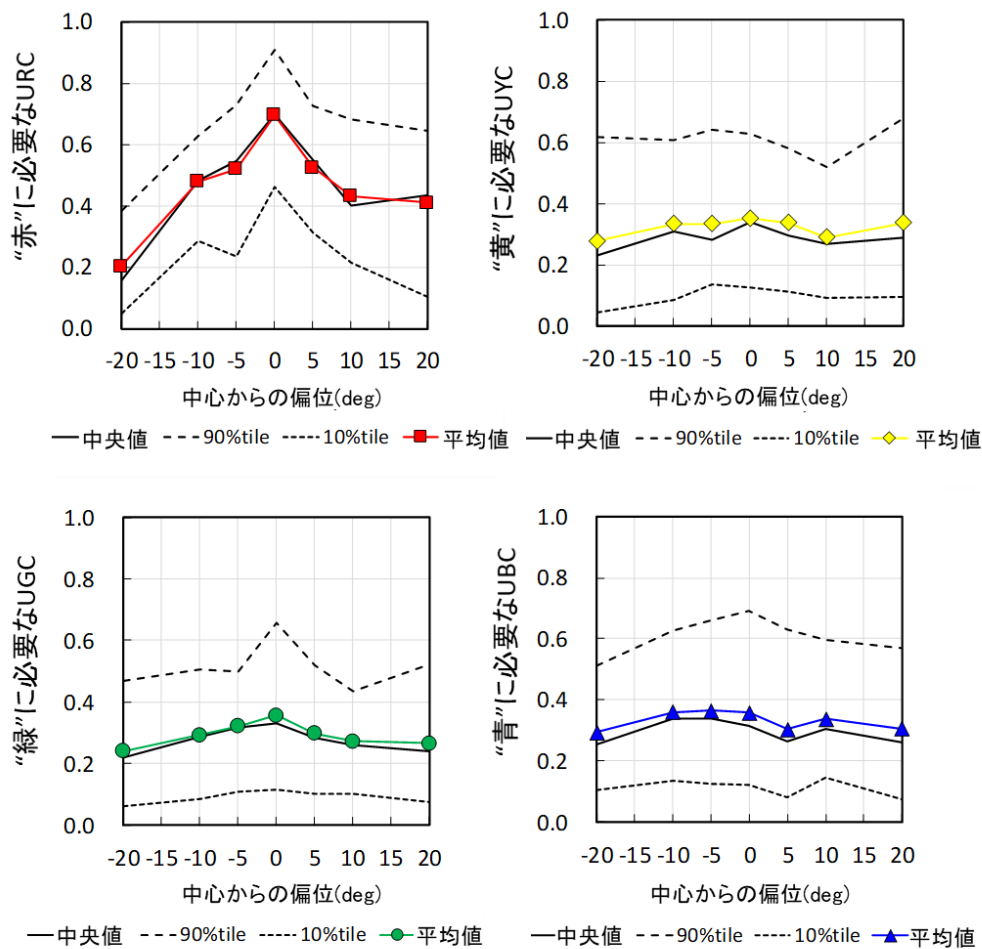


図 4-2. 視野の水平方向で鼻側方向から耳側方向にかけての各色名に必要な UHC

4.3 周辺視における色の見えの基盤メカニズムとその特性

本研究の実験結果より、色相と知覚的飽和度の判断は、色相は赤みがかった刺激と緑がかった刺激は黄色側にシフトし、知覚的飽和度は中心からの偏位(視野位置)が周辺視になるとともに減少していく。また、中心からの偏位(視野の位置)が低い位置での赤色の判別と、カテゴリカルカラーネーミングにおける周辺視での黄色と青色の持続性は、現在までの既往研究により最も一般的によくみられる特性である。これらの特性は、中心からの偏位(視野の位置)に関する網膜および皮質色覚メカニズム(cortical color vision mechanism)の変化に基づいていると考えられる。桿体への侵入と、無彩色(またはルミナンス)やチャンネルの活動に対する有彩色チャンネルの活動の減少は、知覚的飽和度の減少を説明するために必要な2つの有力な候補となって

いる。Volbrecht らによって報告された一連の研究^{14, 52, 53)}では、水平方向および垂直方向に沿って 10° の中心からの偏位（視野位置）のさまざまな波長の刺激に対する錐体の橋渡しとなる条件下での飽和度の減少は顕著ではなく、さらに大きな増加傾向を示し、中心窩の場合よりも飽和状態であり中波長領域でよく見られた⁵³⁾。彼らの結果、および Stabell B と Stabell U による一連の研究の結果^{3, 7, 8)}は、桿体の活動が周辺の飽和度の低下に寄与していることを強く示唆している。逆に、後者の候補である無彩色チャンネルの活動と比較した有彩色チャンネルの活動の減少も、様々な研究において確認されている。Mullen ら^{54, 55)}は、視野の鼻側方向の網膜で $2^\circ \sim 30^\circ$ の間のエッジのない刺激を使用して、無彩色と有彩色のコントラストの感度を測定している。Mullen らの研究では、中心からの偏位による RG コントラストの感度の低下が最も顕著であり、BrY コントラストがそれに続く結果となっており、無彩色コントラストの感度低下は最も低い結果となっていた。したがって、無彩色のコントラスト感度は、周辺網膜の有彩色のコントラストの感度よりも明らかに高い結果となっていた。

Hansen et al.⁵⁶⁾は、色検出実験に基づき、3つのチャンネルの 10° から 50° の範囲での中心からの偏位に応じた錐体のコントラスト感度の変化を示し、Mullen et al の研究との量的な違いが指摘されたものの、無彩色チャンネルの感度の低下は Mullen et al の実験結果よりも小さいことを示した。異なる2つの錐体の反対チャンネルであるこれらの心理物理学的結果は、2番目の候補である無彩色チャンネルの活動の相対的な増加に対する強力な証拠をサポートする結果を与えている。また、刺激サイズが一定で、桿体の鈍感化へ特別な適応が採用されなかった場合には、桿体の侵入と色チャンネルの活動の相対的な減少の両方が候補として、周辺の色刺激の不飽和化に寄与する可能性がある。まだ未実施のものは、前述した2つの候補が、異なる偏移角間で飽和の減少にどのように、そしてどの程度寄与するかにある。周辺の色相シフトについては、赤緑の反対色メカニズムが黄青の反対色メカニズムに相対的に減少する現象については広く知られている研究結果である。この赤みがかった緑がかった刺激を伴う黄色への色相シフトは、その仮説により簡単に説明できる。赤-緑および黄-青（または青-黄）メカニズムの最も単純なモデルは、それぞれ LM および S-(L+M) で表される。また L、M、S は、それぞれ敏感な錐体で長波長、中波長、および短波長を示している。上で引用した錐体コントラスト感度の心理物理学的測定は、L-M メカニズムが偏心に関して S-(L+M) メカニズムよりも急でより深刻な感度の低下が示されている⁵⁴⁻⁵⁶⁾。McKeefry et al.¹³⁾は、傍中心窩 (parafovea、視野の鼻側 1°)、周辺付近で主に視野の鼻側 18° に提示された刺激間の非対称カラーマッチングを使用し、色の見えの変化を測定し、周辺の S-(L+M) メカニズムにより LM にはより大きな増幅が必要であることを示した。これらの結果は、周辺の黄青の反対色のメカニズムよりも赤緑の強い減少を表す仮説を示している。また、生理学的知見に基づく色覚モデルの最近の研究で

は、脳の色知覚と網膜または外側膝状体(LGN)の錐体反対メカニズムとの関係がより複雑であることが示されている。新しい色覚モデルでは、L-Mセルと M-Lセルは赤緑色の知覚に関与せず、代わりにエッジ検出に寄与し、S 錐体の入力を含むニューラルネットワークは色情報の伝達手段であることが示されている⁵⁷⁻⁶⁰⁾。それとは逆に、補償光学系と心理物理学を統合した実験を行った研究結果では、受容体の分布と色覚の間の関連が明らかになってきており、L 錐体 M 錐体は、それぞれ赤と緑の知覚に寄与するが、周囲の錐体の空間配置は、色情報を伝達することで、より複雑な役割を果たしている。

4.4 本章のまとめ

色の見えは、基本色と本質的に同じ色相と知覚的飽和度の判定、とカテゴリカルカラーネーミングという 2 つの方法を使用し、3 人の色覚正常な被験者の応答によって測定がなされた。テスト刺激のサイズは直径が 0.5° であり、テスト刺激中心からの偏位（視野位置）は 0° 、 5° 、 10° 、 20° で、方向は垂直方向と水平方向に提示された。実験結果から、赤みがかった刺激と緑がかった刺激の知覚的飽和度の低下と黄色への色相のシフトは、同じ中心からの偏位（視野位置）での既往研究の結果である 1.85° の刺激に対し 0.5° の刺激の方が顕著な結果を示すことがわかった。また、 0° でのカテゴリカルカラーネーミングの結果は、既往研究の直径 2° の刺激を使用した結果とほぼ同等の結果を示した。さらには、カラーネーミングの悪化は、視野の上側方向に提示された刺激に対して最も顕著な結果を示したのに対し、最も緩やかな悪化は、視野の耳側方向に提示された刺激に対してであった。また、色相と知覚的飽和度の判定結果における色相応答とカテゴリカルカラーネーミングとの関係は、本研究で測定された場所ではほぼ同じ結果であった。ただし、色名赤を引き出すために必要な固有の赤成分は、他の原色よりも大幅に高く、特に 0° で、その色の特異性を示唆している。

第5章 ネットワークモデル

カテゴリーカルカラーネーミング法は幅広い言語からなる実験データが既往研究の結果より蓄積されているが、主に英語圏などに代表される主要な言語は共通して、色空間の同じ領域に対応する 11 色の基本色名からなることは広く知られている^{24, 25-26, 65}。

また、11 の基本色名に対応した色を識別する工程は、人間と霊長類では共通していることから、光源特性から色覚メカニズムを導出する過程が同じアルゴリズムに基づいていることを示唆している⁶⁶⁻⁶⁸。しかしながら、人間の場合では、文化的もしくは言語的な影響から、青みがかった領域では明るさの軸に沿った色カテゴリの細分化がなされること^{37, 39, 69-70}や、基本色名での領域の境界付近、および形容詞の使用法などによって表現されることが示されている⁷¹⁻⁷²。これらは人類学的観点からみても興味深い問題であり、広範囲な使用を目的とした色分けに役立つ可能性があるが、本研究ではそこまでを研究の対象とはしていない。

次に 2 つのカラーネーミング法であるエレメンタリーカラーネーミングとカテゴリーカルカラーネーミングを使用し、同じ実験条件下で同じ被験者を使用し得られた実験結果を報告している研究はごくわずかではあるが存在している^{11, 31, 64}。

また、本研究の第 2 章の実験結果のうち、色相と知覚的飽和度の判定の結果では、中心からの偏位（視野位置）に従い赤みがかった緑がかった刺激の知覚的飽和度の低下と黄色への色相のシフトを示し、カテゴリーカルカラーネーミングの結果では、10° で軽度の劣化と 20° で重度の障害を示した。ここで障害とは、中心からの偏位（が中心から離れるほどカテゴリーカル色応答 (CCR は categorical color response の略) が不安定になり、単一の被験者内での一貫性が低下し、異なる被験者間での一致性が低下する傾向を示すことを意味している。ただし、カテゴリーカル色応答 (CCR) と色相および飽和度の判定との関係を分析すると、8 つの基本カテゴリーカル色応答 (CCR) の赤緑および黄青平面の色相角の中央値は、実験を行ったすべての場所において一定のままであったことがわかっているが、これは、反対色コーディングとカテゴリーカルカラーコーディングレベルの関係が中心からの偏位（視野位置）によって変化しないことを意味していると考えている。

本章では、第 3 章で得られたカテゴリーカルカラーネーミング評価とエレメンタリーカラーネーミングの実験データに、Okajima ら³¹⁾が提唱したネットワークモデルを適用し、周辺視での小視野刺激にどの程度適用可能なのかについて検討する。

5.1 Okajima らのネットワークモデル

Okajima ら³¹⁾は、反対色コーディングレベルでの赤、緑、黄、青、白黒の応答をカテゴリカルカラーコーディングレベルでのカテゴリカル色応答(CCR)に接続するネットワークモデルを提案している。Okajima ら³¹⁾は、2人の被験者の中心窩で2°の刺激を使用して得られたデータの推定に成功している(2人の被験者の正しい推定率は97.0%および92.7%であった³¹⁾。

図5-1は、この研究で使用したネットワークモデルの構造を示している。これは、Okajima らの元の図からわずかに変更されており、実験結果がモデルにどのように入力されるかを示している。モデルの特徴は以下の3つである。

1) 3つの反対色プロセスのニューラル応答(つまり、赤-緑、黄-青(それぞれr/gおよびy/bチャンネルとして示す)と白-黒)に基づいてニューラルネットワークを介した11色のカテゴリカル色応答出力を導出する。2) 有彩色と無彩色のカテゴリ色に対して別々の最大値検出器を仮定する。3) 最終カテゴリカル色応答(CCR)を決定するためのゲートの閾値を仮定する。有彩色カテゴリカル色応答の最大値が閾値以上ならその有彩色がCCR、閾値以下なら無彩色カテゴリカル色応答の最大値がCCRとなる。

Okajima らによる原図と異なるのはゲイン記号がすべてのカテゴリカラーセルに追加されている点である。

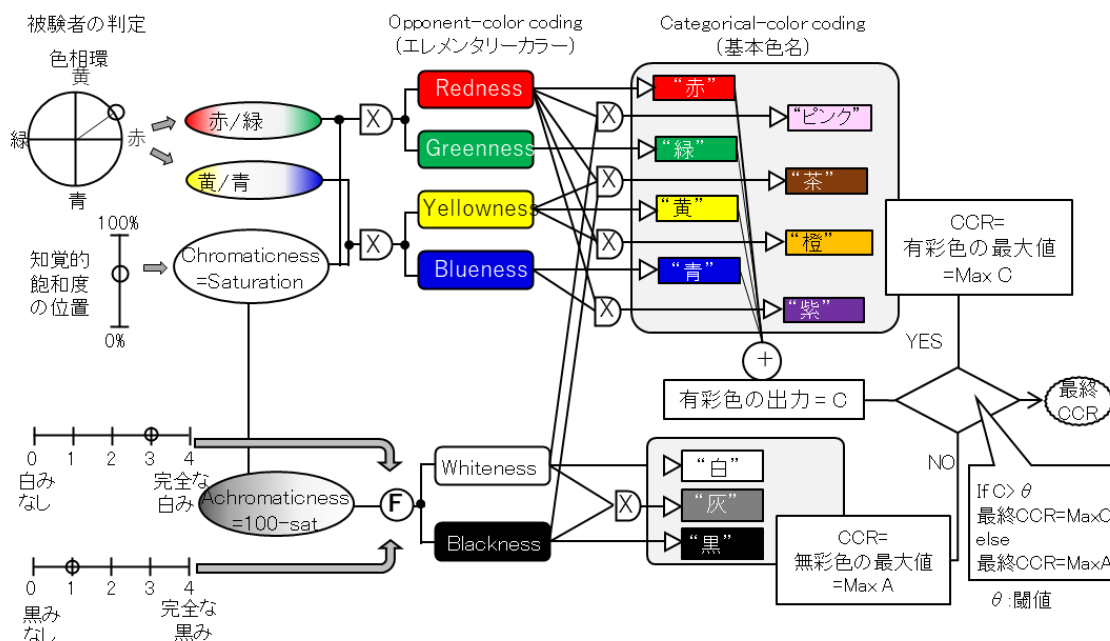


図5-1. Okajima らのネットワークモデルを介した、色相、彩度、黒み、白みの被験者の判定からカテゴリカル色応答決定に至るフロー

5.2 Okajima らのネットワークモデルの本研究結果への適用

5.2.1 実験結果からモデルへの入力

表 5-1 で、 $|red|$ 、 $|green|$ 、 $|yellow|$ 、および $|blue|$ は、それぞれ固有の赤(URC)、固有の緑(UGC)、固有の黄色(UYC)、固有の青(UBC)コンポーネントを示す。これらは、図 5-1 の赤、黄、緑、青を示し、それぞれ URC、UGC、UYC、および UBC とともに式の右辺に表記される。(1)の sat は知覚的飽和度のパーセンテージであり、%red は色相判定における赤のパーセンテージを示している。本研究で被験者が示す色相環の色相角が赤軸と黄色軸の間の象限で 18° の場合、赤色は 80%、黄色は 20%になる。表 5-1 の(2)(4)式で示す通り、hue and saturation judgement の色相応答で赤だけの場合、つまり色相環での赤軸上をポインティングした場合、%red は 100 である。エレメンタリーカラーネーミングで黄だけ又は青だけ、つまり色相環での垂直軸上の黄又は青の位置をポインティングした場合の場合、%red は 0 となる。 $|green|$ 、 $|yellow|$ 、 $|blue|$ についても同じことが言える。また本研究では知覚的飽和度は、飽和度評価線上の位置から算出されるが、その値が sat であり、表 5-1 の式で用いられる。(100-sat)は刺激の無彩色成分を示す。

表 5-1. 反対色コーディングレベルの出力を表す式

式	No.
$ red = URC = \frac{sat}{100} \cdot \frac{\%red}{100}$	(1)
$ green = UGC = \frac{sat}{100} \cdot \frac{\%green}{100}$	(2)
$ yellow = UYC = \frac{sat}{100} \cdot \frac{\%yellow}{100}$	(3)
$ blue = UBC = \frac{sat}{100} \cdot \frac{\%blue}{100}$	(4)
$whiteP = NIL$ の場合 $ white = NIL$ $blackP = NIL$ の場合 $ white = \frac{whiteP}{4} \cdot \frac{(100 - sat)}{100}$	(5-1)
$whiteP = 0$ and $blackP = 0$ の場合 $ white = \frac{1}{2} \cdot \frac{(100 - sat)}{100}$	(5-2)
$whiteP \neq NIL$ and $blackP \neq NIL$ の場合 $ white = \frac{(100 - sat)}{100} \cdot \frac{whiteP}{(whiteP + blackP)}$	(5-3)
$blackP = NIL$ の場合 $ black = NIL$ $whiteP = NIL$ の場合 $ black = \frac{blackP}{4} \cdot \frac{(100 - sat)}{100}$	(6-1)
$blackP = 0$ and $whiteP = 0$ の場合 $ black = \frac{1}{2} \cdot \frac{(100 - sat)}{100}$	(6-2)
$blackP \neq NIL$ and $whiteP \neq NIL$ の場合 $ black = \frac{(100 - sat)}{100} \cdot \frac{blackP}{(whiteP + blackP)}$	(6-3)

第2章の実験で、被験者は、0は(黒みまたは白みはなし)から4(完全な黒みまたは完全な白み)までの5ランクのスケーリング法を使用し、白みと黒みの両方を評価するように求められた。表5-1の(5-1)～(5-3)、(6-1)～(6-3)まで、whitePおよびblackPは、それぞれ上記の評価で白みおよび黒色度に割り当てられた点を示している。非常に飽和した刺激の場合、黒みも白みも知覚されないとして、whitePとblackPの両方が0となる可能性がある。しかし、同時に白みと黒みでいっぱいになる刺激はないため、両方が同時に4になることはないとした。

5.2.2 カテゴリカル色応答の導出

反対色コーディングレベルの応答を入力した場合のカテゴリカルカラー応答が式(7)～(17)に従って生成される。これらを表 5-2 にまとめて記載する。ここで、 $\langle \text{red} \rangle$ は、図 5-1 で“red”として示されているカテゴリカル赤応答のニューラル応答を示している。他の基本色名の応答についても同じで、係数 k_i ($i = \text{red, green, yellow, blue, orange, purple, pink, brown, white, black, gray}$) は、ゲイン制御の係数である。元のモデル³¹⁾では、係数はオレンジ、紫、ピンク、茶色、灰色の2次色に対してのみ定義されていたが、本研究では周辺の結果を含むすべての結果を説明するには不十分であったため、すべてのカテゴリカル色に係数を導入している。また、11 個の係数の最適な組み合わせを決定する方法は、後程詳しく説明する。

表 5-2. 各カテゴリカルカラーのニューラル応答を表す式

式	No.
$\langle \text{red} \rangle = \frac{1}{K_{\text{red}}} \cdot \text{red} $	(7)
$\langle \text{green} \rangle = \frac{1}{K_{\text{green}}} \cdot \text{green} $	(8)
$\langle \text{yellow} \rangle = \frac{1}{K_{\text{yellow}}} \cdot \text{yellow} $	(9)
$\langle \text{blue} \rangle = \frac{1}{K_{\text{blue}}} \cdot \text{blue} $	(10)
$\langle \text{orange} \rangle = \frac{1}{K_{\text{orange}}} \cdot \text{red} \cdot \text{yellow} $	(11)
$\langle \text{purple} \rangle = \frac{1}{K_{\text{purple}}} \cdot \text{red} \cdot \text{blue} $	(12)
$\langle \text{pink} \rangle = \frac{1}{K_{\text{pink}}} \cdot \text{red} \cdot \text{white} $	(13)
$\langle \text{brown} \rangle = \frac{1}{K_{\text{brown}}} \cdot \text{yellow} \cdot \text{red} \cdot \text{black} $	(14)
$\langle \text{white} \rangle = \frac{1}{K_{\text{white}}} \cdot \text{white} $	(15)
$\langle \text{black} \rangle = \frac{1}{K_{\text{black}}} \cdot \text{black} $	(16)
$\langle \text{gray} \rangle = \frac{1}{K_{\text{gray}}} \cdot \text{white} \cdot \text{black} $	(17)

図 5-1 では、3 つの無彩色セルと 8 つの有彩色セルがカテゴリカルカラーコーディングレベルで描画されているが、これはすべてのセルが同時に応答値を持つことを意

味するわけではない。例えば、反対色コーディングの出力が赤み、黄み、白み、黒みの場合、有彩色では、red、yellow、pink、brown、orange にはいくつかの色がある。無彩色の場合、white、gray、black にはある程度の値がある。その場合、green、blue、purple のセルは励起されることはない。上記の例は、最大数のセルが励起された場合であり、色彩的に反対の色応答が green と blue である場合、green と blue のセルのみが色色の応答値を持つことを示している。カテゴリカラー応答の中で、カテゴリカル基本色(red、yellow、green、blue)の合計が色出力 C として定義される。C が 0 より大きい場合、有彩色の最大応答が最終カテゴリカル色応答(CCR: Categorical color response)になる。それ以外の場合は、無彩色の最大値が最終カテゴリカル色応答(CCR)になる。

前述のように、 0° の結果だけでなく周辺の結果にも適切に適合させるには、すべての色にゲイン係数を導入する必要がある。そのため、1 個のパラメーターの最適な組み合わせを検索するためには、いくつかの戦略が必要になった。まず、有彩色カテゴリカル色応答(CCR)のゲイン係数に制限を課した。例えば、反対色コーディングレベルの測定された応答が|red|だった場合および|yellow|カテゴリカル色応答(CCR)が特定の刺激に対して赤であった場合、 $\langle \text{red} \rangle$ (式(7))は $\langle \text{yellow} \rangle$ よりも大きくなり、表 5-3 の不等式(18)が得られる。同様に、不等式(19) - (21)表 5-3 で、 K_{red} と K_{orange} 、 K_{red} と K_{pink} 、および K_{red} と K_{brown} は、 $\langle \text{red} \rangle$ がそれぞれ $\langle \text{orange} \rangle$ 、 $\langle \text{pink} \rangle$ 、または $\langle \text{brown} \rangle$ よりも大きくななければならないという制限から導き出されている。これらの式は、図 5-1 に示すように、反対色コーディングレベルの赤みセルとカテゴリカル色応答(CCR)レベルのカラーセルを結ぶ線に対応している。この場合、赤セルの応答値、つまり、赤みからの直線によってもたらされる $\langle \text{red} \rangle$ は、被験者のカテゴリカル色応答(CCR)が赤であったため、すべてのカテゴリカラーセルの中で最大になるはずである。他のカテゴリカル色応答(CCR)については、同様の制限が導き出されたが、 K_{red} ほど多くはない。たとえば、反対色コーディングレベルの測定された応答が|green|だった場合および|yellow|のカテゴリカル色応答(CCR)が緑の場合、 $\langle \text{green} \rangle$ は $\langle \text{yellow} \rangle$ よりも大きくする必要がある。これには、 K_{green} が K_{yellow} に対してのみ表 5-1 の不等式(22)を満たす必要がある。

表 5-3. 実験 CCR が red の場合のゲイン係数の制約条件

式	No.
$K_{red} < \frac{ red }{ yellow } \cdot K_{yellow}$	(18)
$K_{red} < \frac{1}{ yellow } \cdot K_{orange}$	(19)
$K_{red} < \frac{1}{ white } \cdot K_{pink}$	(20)
$K_{red} < \frac{1}{ yellow \cdot black } \cdot K_{brown}$	(21)
$K_{green} < \frac{ green }{ yellow } \cdot K_{yellow}$	(22)

8つの有彩色カテゴリカル色応答 (CCR) について、29 の不等式を導き出した。時折、矛盾する不等式が得られ、そのような場合、原色の基本色応答<red>、<green>、<yellow>、<blue>の不等式を優先した。55 の刺激のそれぞれの制限をチェックすることにより、各 gain 係数の K_i の検索範囲は、各場所で特定の範囲に狭めることが可能となった。また、無彩色のゲイン係数については、被験者 AK と KF の便宜のために、 $K_{white} = K_{black} = 1$ と $K_{gray} = 0.5$ を設定した。被験者 KH の場合は、被験者 KH が他の 2 人の被験者よりもはるかに頻繁に灰色応答が出現し、より一致する傾向がみられたため、 $K_{gray}=0.25$ を採用した。多くの場合、黒み成分に何らかの値を割り当てたものの、本研究における実験のどの被験者についても黒の応答は出現しなかった。また各 K_i に対して効率的で適切な検索範囲を設定した後、最大となる正答率の応答を生成した有彩色カテゴリカル色応答 (CCR) の K_i ($i=red, green, yellow, blue, orange, purple, pink$) の最適な組み合わせとなる 55 刺激は、計 13 の場所におけるそれぞれで 5 回ずつ繰り返した結果をそれぞれについて計算で検索して求めた。ここでの 5 回の繰り返しは、実験で行われた 5 回のセッション結果を意味している。また、視野の上側方向で 20° で得られた「見えない」応答は、推定した正答率の推定から除外した。また、異なるパラメーターの組み合わせで同じ数の正しい推定値が生成された場合、原色名が red、yellow、green、blue の正しい推定値を優先した。これらの計算を行った後、 θ の適切な値が決定された。閾値 θ は、無彩色応答の頻度を制御している。 θ が小さい場合は、無彩色カテゴリカル色応答 (CCR) 推定数は少なくなり、大きい場合は、逆の結

果となる。したがって、 Θ の値は、white または gray の応答を推定するためには適切な値に設定する必要がある。

次に、13 か所の場所のそれぞれにおいて 3 人の被験者の各セッションのゲイン係数 K_i (i =red、green など) と Θ の最適な組み合わせ、要するに各被験者での 65 の組み合わせを決定した。3 名のゲイン係数の位置による変動のグラフを付録図 5-5A に載せる。被験者 AK の場合は、 20° K_i (i =green、yellow、blue、orange、purple) では、他の場所の K_i よりも小さくなる傾向があった。被験者 KH の場合は、すべての色で、 K_i が中心からの偏位（視野位置）とともに減少する傾向があり、被験者 KF では中心からの偏位（視野位置）に関する系統的な傾向は見られなかった。また、異なる色（8 つの有彩色）と 9 つの場所の間の変動性を調べるために、2 元配置分散分析を実行したところ、 20° の中心からの偏位（視野位置）で「見えない」および「不定」の応答が発生したため、他の場所よりも分析に使用できる応答が少なかったことから、上下左右 4 か所の 20° の中心からの偏位（視野位置）は 2 元配置分散分析から除外することにした。計算した結果は当初の予想通りであり、各色の要素はすべての被験者にとって重要であるという結果になった。場所毎の要素は、2 人の被験者では有意性はみられなかったが（被験者 AK と KF ではそれぞれ $P=0.129$ と 0.621 ）、被験者 KH では有意性がみられた（ $P=0.0081$ ）。 K_i は、反対色カラーコーディングレベルをカテゴリカルカラーコーディングレベルに接続するゲイン係数であり、おそらく脳内にある色認識プロセスのより高次レベルでの増幅機能を反映している。したがって、最も簡単なアプローチ方法は、すべての場所のカテゴリカラーごとに単一の K_i 値を使用することである。1 人の被験者 KH にとって位置による変動は有意であったが、変動の少ない水平方向と垂直方向での 0° 、 5° 、 10° の 9 つの位置から得られた総平均を代表的な K_i として使用した。この仮定は、4.1 で示した特定のカテゴリカル色応答 (CCR) を引き出すために使用される色相環の色相角の中央値は、すべての場所で一定に保たれていた結果と整合する。表 5-4 に示すように、有彩色の K_i 値は無彩色の K_i 値よりも小さくなっている。

その理由は以下のとおりである。 $|\text{red}|$ 、 $|\text{green}|$ 、 $|\text{yellow}|$ 、 $|\text{blue}|$ の絶対値の最小値は式 (1) から (4) から、それぞれ赤、緑、黄色、青の応答を求めると、3 人の被験者での値は 0.01 から 0.07 であった。これらの場合、式 (15) から (17) で定義される $\langle \text{white} \rangle$ 、 $\langle \text{black} \rangle$ 、 $\langle \text{gray} \rangle$ の応答は、 K_{white} の値を使用したため、表 5-4 に示すように、 K_{black} と K_{gray} それぞれは 0.4 から 0.99 の範囲でかなり大きい結果であった。また、無彩色応答を無効にして有彩色カテゴリカル色応答 (CCR) を引き出したいときには、有彩色の K_i の値を表 5-3 に示す条件を満足する値まで小さくする必要がある。

また、一元配置分散分析を使用して、異なる場所での Θ の変動性を調査した。3 名の Θ の位置による変動のグラフを付録図 5-6A に載せる。位置毎の係数は、被験者 AK および KH ($P=0.00048$ および 0.0438) で有意であったが、KF ($P=0.453$) では有意性はみら

れなかった。そのため、被験者 AK と KH については、各場所での θ の平均値を採用し、被験者 KF については、すべての場所での θ の総平均を採用することにした。検討した θ の値を表 5-5 に示す。ここで K_i と θ は相対的な値であることに注意する必要がある。この相対的な値の意味は例えば、相対比を一定に保ちながら K_i 値に 10 を掛け、 θ の値の 10 分の 1 にした値を使用すると、同じ推定値が得られるという意味を示す。この研究で採用された K_i と θ の絶対値は、 K_i 値の範囲を制限する〈white〉、〈black〉、〈gray〉応答の絶対値を決定する $K_{\text{white}} = K_{\text{black}} = 1$ の設定によって決定されている。 K_i と θ は、カテゴリカル色応答 (CCR) の個々のプロパティを反映している。有彩色の色名の K_i 値を、3 人の被験者のすべての場所において対応する色名の応答の総数を比較した結果、 K_{red} を除くすべての有彩色 K_i は、 K_i の値が小さいほど、その色名の応答の総数が増える傾向を示すことがわかった。たとえば、 K_{green} の値は最小から順に被験者 AK、KF、KH となったが、それに対して緑応答の総数の順序は逆となっていた (被験者 AK、KF、KH の場合はそれぞれ 131、124、および 115)。しかし、 K_{red} の場合は異なっている。被験者 AK の場合、 K_{red} が最大るとき、AK には合計 52 の赤応答があり、KF と KH のそれぞれ 7 と 25 の赤応答を大幅に上回った。この K_{red} が他の K_i とは逆の傾向を示した理由は現時点では不明である。被験者 KF の色彩閾値 θ は他の 2 人の被験者の色彩閾値 θ よりも小さかった。これは被験者 KF のために知覚的飽和度の低い色刺激にも色彩名を割り当てようとする被験者 KF 固有の傾向を反映している。 θ は、〈red〉、〈yellow〉、〈green〉、〈blue〉の応答の合計によって定義される色度と比較した閾値である。最小色度値を比較し、3 人の被験者の 13 か所で色名を出力した。被験者 KF の平均値は 0.70 であり、彼の θ である 0.66 よりもわずかに大きいのに対し、被験者 AK と KH の平均値はそれぞれ 3.15 と 5.96 であった。これは、被験者 KF の無彩色カテゴリカル色応答 (CCR) が非常に少ないことにも対応している。彼は実験を通して白に 3 回しか応答しなかったのに対し、被験者 AK は合計 7 つの白と 5 つの灰色で応答し、KH は合計 6 つの白と 46 の灰色で応答した。したがって、色彩閾値 θ は、色彩カテゴリカル色応答 (CCR) を割り当てるための個々の基準を示している。

表 5-4. (a) 3 人の被験者のカテゴリ毎の色応答のゲイン

被験者	Kred	Kgreen	Kyellow	Kblue	Korange	Kpurple
AK	0.0218	0.0158	0.0267	0.0198	0.0019	0.0009
KF	0.0174	0.0234	0.0213	0.0246	0.0017	0.0015
KH	0.0177	0.0268	0.0216	0.0212	0.0039	0.0028

表 5-4. (b)

被験者	Kpink	Kbrown	Kblack	Kwhite	Kgray
AK	0.0142	0.0108	1	1	0.5
KF	0.0193	0.0236	1	1	0.5
KH	0.0088	0.0089	1	1	0.25

表 5-5. (a) 3 人の被験者のカテゴリ毎の色応答の閾値 (threshold)

	水平方向の中心からの偏位毎の閾値(deg)						
被験者	-20	-10	-5	0	5	10	20
AK	1.20	2.52	3.37	3.09	2.96	2.59	0.93
KF	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
KH	4.51	5.29	6.78	7.70	6.27	5.98	6.37

表 5-5. (b)

	垂直方向の中心からの偏位毎の閾値 (deg)						
被験者	-20	-10	-5	0	5	10	20.00
AK	0.87	1.85	2.81	3.09	2.43	1.35	0.83
KF	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
KH	3.89	6.37	7.69	7.70	4.98	4.00	4.55

5.2.3 不定応答の決定方法

同じ色のテスト刺激が常に同じカテゴリカルカラーネーミングになるとは限らない。特に、基本色名の境界に色相が表示される場合や、知覚的飽和度が非常に低い場合が想定されるであろう。第 3 章の実験結果では、実験を通して、被験者は各場所でテスト刺激毎に 5 回ずつ応答を行い、被験者が 5 回の繰り返しの回答結果のうち 3 回

以上同じ色名または「見えない」応答をした場合には、その場所でその被験者の刺激に指定された色名または「見えない」が割り当てられた。色名が割り当てられたとき、それはその場所での刺激とその被験者の代表的な色応答と呼ばれることになる。それ以外の場合は、例えば、2回が黄、2回がオレンジ、1回が赤であった場合には、刺激の色は「不定」とであると判定される。したがって、テスト刺激の応答結果の各セット(色相と知覚的飽和度(もしくは彩度)の判定、および白みと黒みの評価)のデータセットをネットワークモデルに5回入力し、5つのカテゴリカル色応答(CCR)を取得することにした。そして、特定の場所で特定の刺激に対し、同じカテゴリカル色応答(CCR)が3回以上出力された場合、そのカテゴリカル色応答(CCR)を刺激の最終的な推定値として採用した。それ以外の場合は、「不定」が最終的な推定結果として出力された。また、本研究の実験で「見えない」応答が得られた場合は、「見えない」応答となりカテゴリカル色応答(CCR)は推定されない。第3章の実験結果では、同じテスト刺激に対する色相と知覚的飽和度の判定結果を5回繰り返した結果間の変動は、平均値に添付された最大標準誤差によってのみ示された(図3-2)。5回繰り返しでの変化の程度を具体的に示すために、第2章の結果での被験者の1人である被験者AKの垂直方向、垂直方向の刺激であるR1、DaY1、BrY1、G1、B1の色相と知覚的飽和度の測定結果を図5-2(a-t)で記す。ここで横軸は視野の中心からの偏位(視野位置)を度($^{\circ}$)で表している。この中心からの偏位(視野位置)の負と正の値は、垂直方向は、それぞれ視野の下側方向と視野の上側方向の角度に対応している。水平方向はそれぞれ視野の鼻側方向と視野の耳側方向の角度に対応している。図5-2内

(a)(c)(e)(g)(i)(k)(m)(o)(q)(s)の縦軸は、図5-1の左下に示す色相環の垂直方向に細長い円周を示している。図5-2内(b)(d)(f)(h)(j)(l)(n)(p)(r)(t)の縦軸は、知覚的飽和度の値を示す。点線で結ばれた空白の菱形は5回の試行の結果を示し、実線で結ばれた塗りつぶされた菱形はそれらの平均値を示している。結果、知覚的飽和度は、R1とB1の両方で中心からの偏位(視野位置)とともに減少する傾向があるが、セッションにより、特に視野の上側方向の場所で大きく変化する結果となった。色相判定の結果は、R1では中心からの偏位(視野位置)により色相の黄方向へのシフトが確認できたが、B1では色相の変化はほとんどみられなかった。R1とB1の5つのカテゴリカル色応答(CCR)は、図5-2に示すように、色相と知覚的飽和度の結果、および実験で得られた白みと黒色度の値を使用して、ネットワークモデルを介して計算を行った。前の研究の他の2人の被験者は、視野の垂直方向に沿ったR1とB1の5回の繰り返しの測定結果間で同じ程度の変動を示した。これらの曲線は、3人の被験者の55の刺激に対して得られた。

5.2.4 カテゴリカル色応答 (CCR) の推定

図 5-3(a)および(b)は、実験で得られた 10 個の刺激のカテゴリカル色応答 (CCR) と、 0° での被験者 AK の各セッションでの推定結果を示している。図 5-3(c) と (d) は視野の上側方向に 20° における同じ結果を示しているが、結果を示す。 0° では、R1、G1、および G7 の推定カテゴリカル色応答 (CCR) は実験結果と完全に一致している。また、最終応答では、8 つの刺激が正しく推定された。これは、 0° における R1、G1 など代表的な色刺激の CCR がネットワークモデルによって適切に推定されていることを示している。 20° でのカテゴリカル色応答 (CCR) 間の実験値と推定値の一致(図 5-3(c)および(d))は、 0° での一致ほどには良い推定とはならなかった。それにもかかわらず、「見えない」応答を除き、すべての最終的な推定カテゴリカル色応答 (CCR) は、「不定」であった 2 つの刺激を含め、実験結果と一致した。同様の推定結果は、視野の上側方向に 0° と 20° での他の 47 の刺激、および残りの 11 の場所で 55 の刺激について得られたが、スペースを節約するためにここには示されていない。

(a) 実験データ 0°						最終 応答	(b) モデルにより定義された色名 0°						最終 応答
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
R1	赤	赤	赤	赤	赤	赤	R1	赤	赤	赤	赤	赤	赤
R5	赤	赤	赤	ピンク	赤	赤	R5	赤	赤	赤	橙	赤	赤
DaY1	黄	黄	黄	黄	橙	黄	DaY1	橙	橙	黄	黄	橙	橙
DaY4	緑	緑	緑	緑	緑	緑	DaY4	緑	黄	緑	緑	緑	緑
BrY2	黄	黄	黄	黄	黄	黄	BrY2	黄	黄	黄	黄	黄	黄
BrY5	黄	黄	黄	黄	黄	黄	BrY5	橙	黄	白	白	黄	不定
G1	緑	緑	緑	緑	緑	緑	G1	緑	緑	緑	緑	緑	緑
G7	緑	緑	緑	緑	緑	緑	G7	緑	緑	緑	緑	緑	緑
B1	紫	青	緑	青	青	青	B1	紫	青	青	青	青	青
B10	紫	紫	緑	紫	紫	紫	B10	紫	紫	紫	紫	紫	紫

(c) 実験データ 20°						最終 応答	(d) モデルにより定義された色名 20°						最終 応答
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
R1	赤	黄	見えない	見えない	青	不定	R1	橙	橙	見えない	見えない	青	不定
R5	見えない	見えない	見えない	赤	青	見えない	R5	見えない	見えない	見えない	橙	青	見えない
DaY1	灰	緑	見えない	見えない	見えない	見えない	DaY1	灰	緑	見えない	見えない	見えない	見えない
DaY4	見えない	黄	見えない	見えない	灰	見えない	DaY4	見えない	橙	見えない	見えない	灰	見えない
BrY2	黄	黄	黄	黄	黄	黄	BrY2	黄	黄	黄	黄	黄	黄
BrY5	黄	黄	白	黄	黄	黄	BrY5	黄	黄	白	黄	黄	黄
G1	緑	見えない	青	見えない	見えない	見えない	G1	緑	見えない	青	見えない	見えない	見えない
G7	灰	黄	見えない	灰	見えない	不定	G7	灰	緑	見えない	灰	見えない	不定
B1	青	青	青	青	青	青	B1	紫	青	青	青	青	青
B10	青	青	青	青	灰	青	B10	紫	青	青	青	灰	青

図 5-3. 被験者 AK の視野の上側方向 0° と 20° での個々の試行のカテゴリカルカラーネーミングの結果

図 5-4 は、3 人の被験者の 0° と視野の水平方向、垂直方向における 5° 、 10° 、 20° でのカテゴリカル色応答 (CCR) の推定結果を示している。色度図にプロットされた色の記号と黒い円は、それぞれ正しく推定された色彩カテゴリカル色応答 (CCR) と不定の結果を示している。小さな点は、推定されたカテゴリカル色応答 (CCR) が実験応答と一致しなかった刺激を示している。右上隅の数字は、見えない応答以外の応答に対する正答率を示している。 0° (図 5-4(1)(2)(3)) では、ほとんどの刺激のカテゴリカル色応答 (CCR) が正しく推定された。正しく推定出来なかったものは、DaY 刺激の黄色がかった領域、赤と紫の応答の間、および 3 人の被験者すべての青と緑の応答の境界付近にあった。また、DaY 刺激の黄色がかった領域、赤と紫の応答の間の不一致は、主に、推定カテゴリカル色応答 (CCR) で茶色とピンクを生成できなかったことに起因している。視野の上部方向の 20° でも、不定のものを含め、ほとんどの刺激のカテゴリカル色応答 (CCR) を正しく推定することが出来た(図 5-4(4)(5)(6))。被験者 AK および KH の場合、色度図上に記載された灰色または白の円で表されている無彩色カテゴリカル色応答 (CCR) も正しく推定することが出来ており、適切な値 θ が選択されたことを示している。図 5-5 は、視野の水平方向と垂直方向における 3 人の被験者の正答率を示している。正答率はすべての場所で約 70%~80% であり、ネットワークモデルによるカテゴリカル色応答 (CCR) の推定が良好であることを示している。他の位置での結果を付録内の図 5-4A に示す。

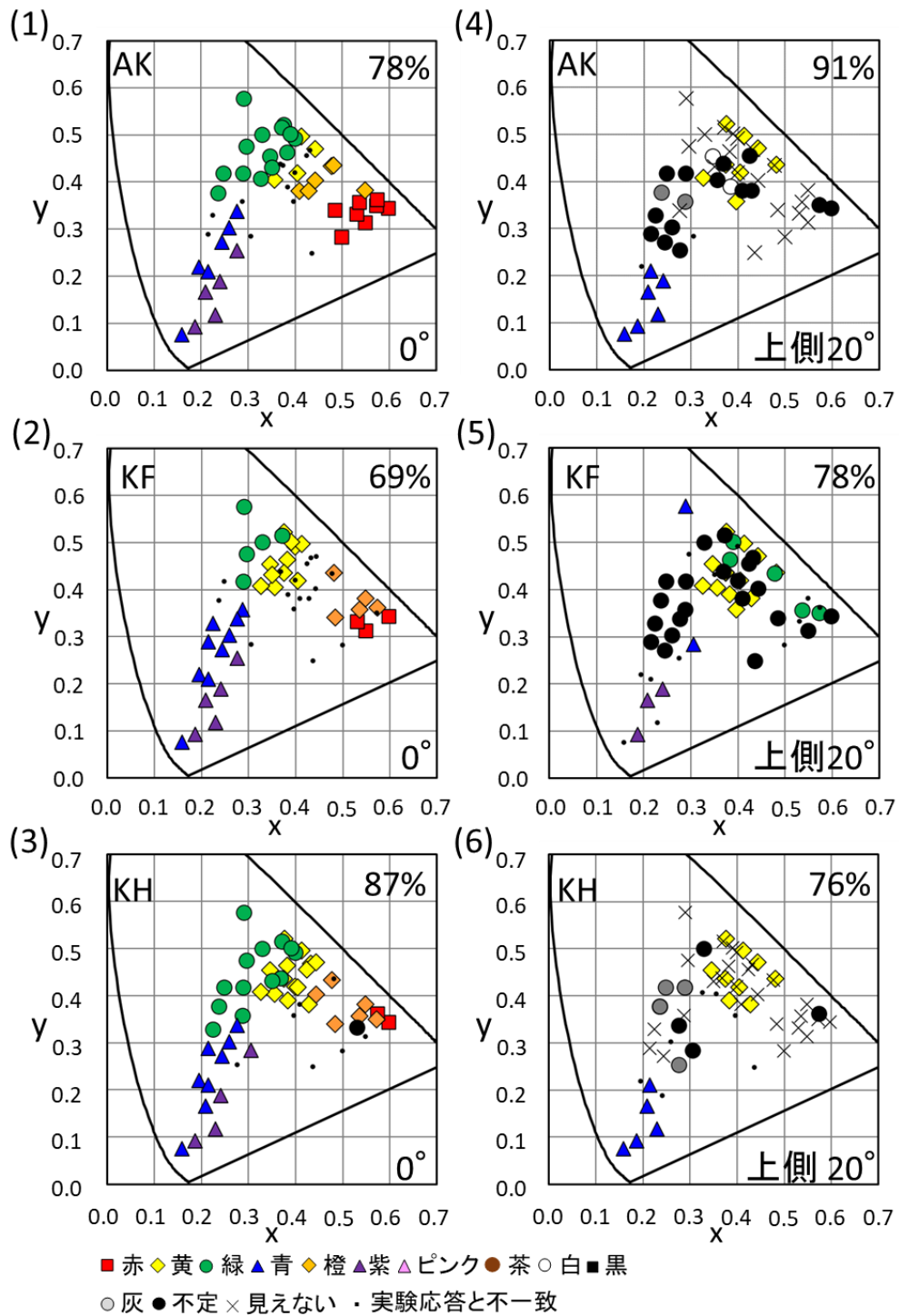


図 5-4. 3 人の被験者、0° と視野の上側方向 20° でのカテゴリカルカラーネーミングの推定結果

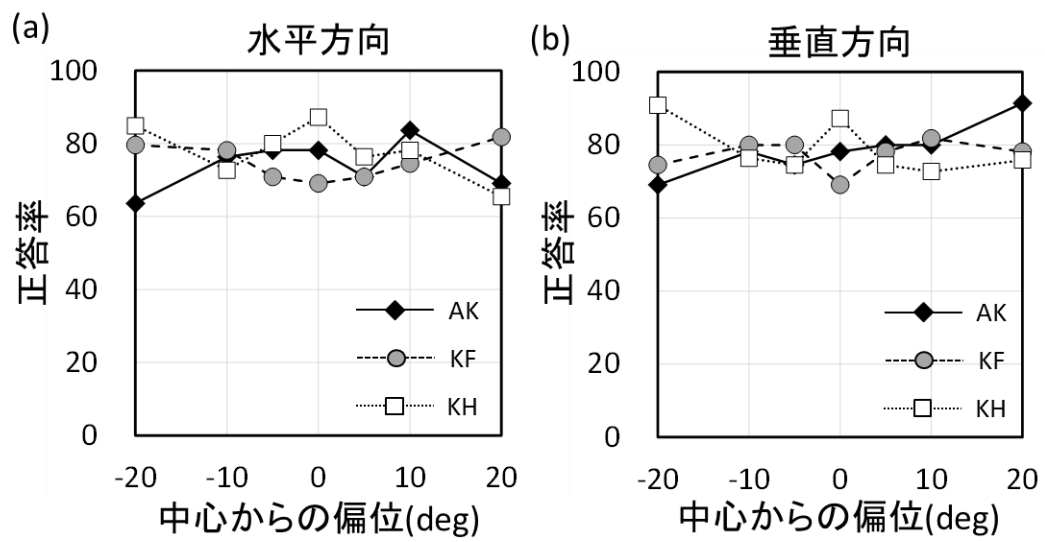


図 5-5. 3 人の被験者の (a) 視野の水平方向と (b) 垂直方向の CCR の正答率

第6章 網膜周辺視の錐体分布と周辺視におけるCCRの不安定性

6.1 錐体分布からCCR応答推定までの流れ

網膜構造、つまり色覚メカニズムの第一段階では、LMS錐体の数が中心からの偏位（視野位置）とともに急激に減少することが広く知られている⁷³⁾。人間の目は、固視中は完全に同じ位置に固定できないことも知られている⁵⁸⁾。したがって、網膜領域のわずかな変動でさえ、励起されたLMS錐体の相対数に影響を及ぼし、その結果、周辺視の同じ刺激に対して異なるカテゴリカル色応答(CCR)が生じる可能性がある。本章では、LMS錐体密度のスパース性（もしくはまばらに分布している状態）と固視の変動からネットワークモデルを介してCCRを推定することによりを想定することにより、それらの要因が周辺視のカテゴリカル色応答(CCR)の不安定性に関与しているかを検討する。

図5-2～5-4に示すように、0°での色相と知覚的飽和度の判定結果とカテゴリカル色応答(CCR)推定の結果は非常に安定しているが、20°での結果はBとBrYの刺激を除いて不安定であった。中心窩と周辺視でみたときの色の見えの結果の間にそのような違いが生じる原因は何であろうか？この疑問に答えるためまず考えられるのは、視覚メカニズムの最初の段階での網膜受容体を考慮することである。一般的に網膜錐体のサイズと密度が不均一であることは既往研究の結果よく知られている。生理学的研究によると、横断面では錐体は非常に小さく、中心窩に密に詰まっているが、周辺では、桿体の存在により密度は減少し個々の錐体も大きくなる⁷³⁾。さらに、中心窩領域近くのLMS錐体モザイクに関する最近の研究では、L錐体とM錐体の密接な配置が均一ではなくランダムである⁵⁸⁾ことを示しており、L錐体とM錐体に局所的な不規則性を生み出していることがわかっている。そのため、図5-4に示すように、中心窩と周辺網膜の間の錐体が詰まっている状態の構造的な違いが、カテゴリカル色応答(CCR)の特性の違いの元の原因であるかどうかを検討することが重要である。さらに、我々の実験では、被験者に予定された場所に刺激を投影するための固視点を凝視するよう指示しているが、Putnum et al.⁷⁴⁾によって報告されているように、人間の目の固視能力は完全には正確ではなく、標準偏差で2.3'～4.8'のばらつきがあることがわかっている。我々の実験では、刺激サイズが一定であったが、周辺部では、異なるタイプの錐

体、特に L 錐体と M 錐体の相対的な数は、人間の固視微動のわずかな変化でも変動している。そのため、小領域内の L 錐体と M 錐体の相対数の変動は、反対色コーディングレベルの出力を変更し、同じ刺激に対しても異なるカテゴリカル色応答 (CCR) をもたらす可能性があることを示唆している。対照的に、S 錐体の分布は半規則的^{61, 75)}であり、網膜の位置の変化によって著しく影響を受けることはない。逆に、固視点を変えると、多数の錐体が中心窩の刺激領域で覆われるため、異なる錐体タイプの相対数は中心窩でほぼ一定のままである。その結果、反対色コーディングレベルは中心窩で一定であり、同じ刺激に対して一貫したカテゴリカル色応答 (CCR) が得られると考え、この仮説を検証することにした。まず、中心窩 (FOVEA) と周辺視鼻側 20° の網膜の錐体モザイク概略図を作成した。次に、LMS 錐体の線形結合を仮定することで、輝度と反対色応答を決定した。最後に、カテゴリカル色応答 (CCR) を推定するために、応答した結果をネットワークモデルに入力した。図 6-1 にシミュレーションフローの図を示す。ここで、左上の画像は、それぞれ中心窩 (Fovea) (a) と視野の鼻側方向 20° (b) の網膜上の視細胞分布シミュレーションのフローを示し、白い円は、カテゴリカル色応答を推定するための領域における、図 6-2 の白い円のそれぞれの輝度、r/g、y/b 関数の変化する位置を示している。

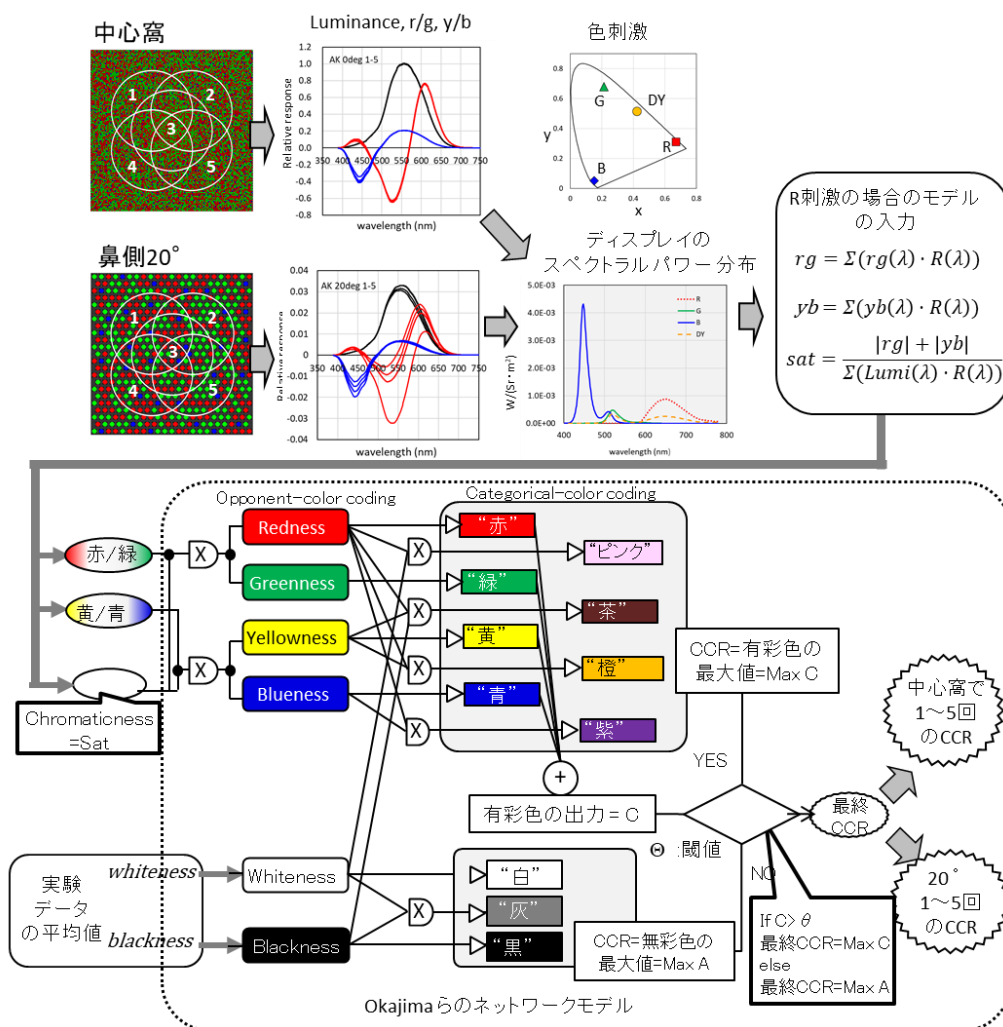


図 6-1 シミュレーションフロー図

6.2 錐体モザイク

図 6-1 の左上にある 2 つの図は、中心窩と周辺の錐体モザイクの概略モデルを示す。拡大図を図 6-2 に示す。図 6-2 (a) の中心窩(Fovea)の錐体モザイクでは、視角約 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、長さ $280 \mu\text{m} \times 280 \mu\text{m}$ に相当する 5000×5000 ピクセルの画像に直径 40 ピクセルの 125×125 の錐体を配置した。視角に対する長さの関係性は、人間の網膜の解剖学的研究に基づいている⁷³⁾。中心窩の S 錐体の比は 5.7% に設定した。これは、4.6% から 6.4% の範囲の生理学的データに相当している⁶¹⁾。また、直径約 0.3° の内側の円を S 錐体のない場所として設定した⁷⁵⁾。L 錐体と M 錐体の比率は、日本人のデータ⁷⁶⁾に従って 1 : 1 に設定した。これは、第 2 章の実験結果におけるすべての被験者が日本人であったためである。図 6-2 (b) の網膜周辺部の錐体モザイクを作成するために、錐

体の直径を中心窩のサイズの4倍に拡大し、桿体に対応する小さな円で空のスペースを埋めることで、中心窩の画像の3.7%に密度を下げた。サイズの拡大と密度の縮小は、Curcio et al の H5L のノマルスキー型微分干渉顕微鏡の画像に基づいている⁷³⁾。これは、我々の既往研究の視野の耳側方向で刺激を提示した状態に対応している。図5-6の中心窩の錐体モザイクの下に周辺視の画像を示す。周辺モザイクのS錐体比は、視野の位置に伴うS錐体の比の増加を反映し6.9%に設定した。錐体モザイク画像におけるLMS錐体の数とその密度を表6-1に示す。中心窩モザイクの錐体密度は $199.3 \times 1000 \text{ cones/mm}^2$ で、Curcio et al の研究(平均 $199.2 \times 1000 \text{ cones/mm}^2$)⁷³⁾の表5-3に記載されているピーク錐体密度に匹敵する。周辺モザイクの錐体密度は $6.8 \times 1000 \text{ cones/mm}^2$ であり、これは図6-1(c)の6mmでの視野の鼻側の曲線からの約 $6.5 \times 1000 \text{ cones/mm}^2$ の錐体密度に匹敵し、これは 21° に相当しており、既往研究と同じ結果に基づいている⁷³⁾。固視微動の変化をシミュレーションするために、円の中心を中心の円(図6-1の光受容体モザイク番号3から $10'$ 移動させた。これは、Putnum et al.⁷⁴⁾の5人の被験者の中で標準偏差が最大の被験者の変化の 2σ にほぼ対応している。想定した動きは左上、右上、左下、右下の4方向であり、対応する円は図6-1の光受容体モザイクで1、2、4、5の番号が付けられている。

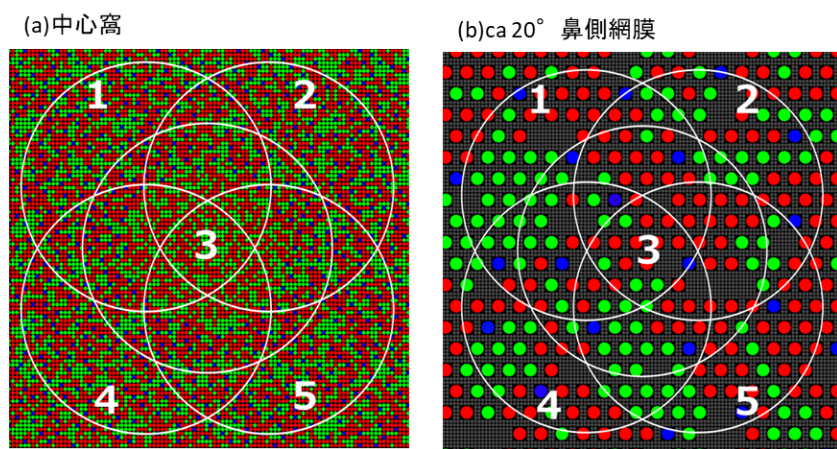


図 6-2. 中心窩と視野の鼻側方向 20° の錐体モザイクの概略モデル

6.3 輝度、r/g、および y/b 関数

次に反対色プロセスの出力を定義したためその内容について記載する。輝度チャンネルのスペクトル感度関数と赤/緑および黄/青チャンネルのスペクトル応答関数(以下、それぞれ r/g および y/b と表記)は、式で表される LMS 錐体のスペクトル感度の線形結合によって定義されると仮定した。(23)-(25) :

$$Lumi(\lambda) = 0.000461 \cdot N_{L,i} \cdot l(\lambda) + 0.000240 N_{M,i} \cdot m(\lambda) \quad (23)$$

$$r/g(\lambda) = w_{rg} \cdot (0.000561 \cdot N_{L,i} \cdot l(\lambda) - 0.000708 \cdot N_{M,i} \cdot m(\lambda) + 0.0005 \cdot N_{S,i} \cdot s(\lambda)) \quad (24)$$

$$y/b(\lambda) = w_{yb} \cdot (0.000238 \cdot N_{L,i} \cdot l(\lambda) + 0.000124 \cdot N_{M,i} \cdot m(\lambda) - 0.00771 \cdot N_{S,i} \cdot s(\lambda)) \quad (25)$$

ここで、 $l(\lambda)$ 、 $m(\lambda)$ 、 $s(\lambda)$ は、錐体色素の分光量子吸収から眼球光学系および黄斑色素の透過率を加味し、且つエネルギー単位に変換され、各々最大値 1.0 で正規化されたスペクトル感度である⁷⁷⁻⁷⁹⁾。 $N_{L,i}$ 、 $N_{M,i}$ 、および $N_{S,i}$ は、それぞれ、表 6-1 に示すように、No. i の円(i=1~5)でカバーされる領域の L、M、S 錐体の数である。ここで w_{rg} および w_{yb} は、各被験者のゲイン係数を使用し、カテゴリカル色応答 (CCR) の結果をできるだけ多くの刺激に適合させるように調整された r/g および y/b の重み係数である (表 5-4)。 $l(\lambda)$ 、 $m(\lambda)$ 、 $s(\lambda)$ の数値係数は小さいように見えるが、中心窩の平均錐体数は $N_{L,ave} = 1495.9$ 、 $N_{M,ave} = 1448.8$ 、 $N_{S,ave} = 129.6$ であった。

既往研究⁷⁹⁾とは異なり、実験結果で時折見られる青みがかった刺激に対する紫の応答を得るために、r/g チャンネルに $s(\lambda)$ も追加した。中心窩および視野鼻側方向の 20° の網膜における輝度チャンネルのスペクトル感度関数と r/g および y/b チャンネルのスペクトル応答関数は、円 1~5 の L、M、S 錐体の数を使用して計算を実施した。

図 6-1 の上部の 2 番目の列に示されている、反対色応答の拡大図を図 6-3 に示す。輝度チャンネルのスペクトル感度関数と r/g および y/b チャンネルのスペクトル応答関数を用いて算出した値を示すし、円 1~5 の L、M、S 錐体の数を使用して計算した結果をしめしている。図に示す (a) と (b) はそれぞれ反対色応答錐体モザイクの概略モデル中心窩 (Fovea) (a) と視野の鼻側方向 20° (b) それぞれでの計算結果を示している。中心窩では、L、M、および S 錐体の数とそれらの相対比がほぼ同じであるため、どの曲線も大きく変化しない。周辺視シミュレーションでは、輝度曲線は大きく変化しなかったが、r/g 曲線と y/b 曲線は著しく変化した。特に、r/g 曲線は、L 錐体と M 錐体の数の変化を反映して、スペクトル全体の異なる円間で大きく異なっている。

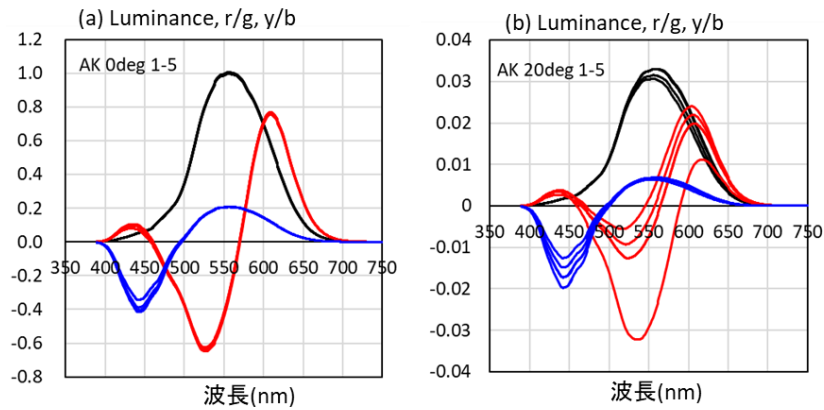


図 6-3. 中心窩および視野鼻側方向の 20° の網膜における反対色応答を示す図

表 6-1 図 6-2 の錐体モザイク概略図における錐体の数

円	中心窩			20° 鼻側網膜		
	L	M	S	L	M	S
1	1518.4	1426.2	130.0	58.8	39.4	7.0
2	1514.3	1424.6	135.8	45.8	52.9	6.7
3	1508.1	1454.1	111.1	49.4	48.4	6.0
4	1459.5	1481.2	133.8	54.0	43.4	8.1
5	1479.1	1457.9	137.5	42.8	56.9	6.1
平均値	1495.9	1448.8	129.6	50.1	48.2	6.8
L, M, S の比率	48.7%	47.1%	4.2%	47.7%	45.8%	6.5%
錐体の総数	3074.3			105.1		
密度(cones/mm ²)x1000	199.7			6.8		

また、既往実験で使用した LCD(Liquid Crystal Display)はかなり古いものであったため、本研究のシミュレーションでは、新しい LCD(EIZO カラーエッジ CG277)のスペクトルパワー分布(spectral power distribution:SPD)を採用した。図 5-6 の右上には、R、G、B、および DaY の SPD 曲線が約 10cd/m²で示されている。これは、前の実験に匹敵する。輝度、r/g、y/b チャンネルのスペクトル感度と各波長での SPD を乗算し、390nm から 780nm のスペクトル範囲で合計すると、次の 3 つのチャンネルの出力が得られる。

$$A = \int E_j(\lambda) \cdot Lumi(\lambda) d\lambda \quad (26)$$

$$rg = \int E_j(\lambda) \cdot r/g(\lambda) d\lambda \quad (27)$$

$$yb = \int E_j(\lambda) \cdot y/b(\lambda) d\lambda \quad (28)$$

ここで、 $E_j(\lambda)$ (j=R、G、B、および DaY)は、R、G、およびB プライマリと DaY の SPD である。

6.4 反対色コーディングレベル

シミュレーションでは、色度と知覚的飽和度は、それぞれCと sat で表され、次式のように定義される。

$$C = |rg| + |yb| \quad (29)$$

$$\text{sat} = \frac{C}{(A+C)} \quad (30)$$

表 6-2 反対色コーディングレベルでのニューラル応答の式

Equation	No.
$\text{Redness or Greenness} = \text{sat} \cdot \frac{rg}{C} = \frac{rg}{(A+C)}$	(31)
$\text{Yellowness or Blueness} = \text{sat} \cdot \frac{yg}{C} = \frac{yg}{(A+C)}$	(32)
In the case of $\text{White}P_{av} = 0$ $\text{Blackness} = \frac{A}{(A+C)} \cdot \frac{\text{Black}P_{av}}{4}$	(33)
In the case of $\text{Black}P_{av} = 0$ $\text{Whiteness} = \frac{A}{(A+C)} \cdot \frac{\text{White}P_{av}}{4}$	(34)
In the case of $\text{Black}P_{av} > 0$ and $\text{White}P_{av} > 0$ $\text{Whiteness or Blackness} = \frac{A}{(A+C)} \cdot \frac{\text{Black}P_{av} \text{ or } \text{White}P_{av}}{(\text{Black}P_{av} + \text{White}P_{av})}$	(35)

図 6-1 の反対色コーディングレベルは、表 6-2 の(31)-(35)を用いて式(1)によって推定される。応答は $rg < 0$ の場合、赤みに割り当てられ式(31)、式(1)で $yb > 0$ の場合、緑に割り当てられる式(32)。応答は黄色度に割り当てられ、 $yb < 0$ の場合は青色度に割り当てられる。これは、図 6-1 のネットワークモデルの Redness セル、Greenness セル、Yellowness セル、Blueness セルが相互に排他的な値を持っていることを意味している。白みと黒みは、輝度、 r/g 、 y/b 曲線から直接推定することはでき

ない。したがって、実験値を使用してそれらを推定する必要がある。実験では、0(白みなしまたは黒みなし、つまり刺激は色成分のみを持っているように見える)から4(完全に白または完全に黒)までの5つのランクのスケールリング方法を採用し、黒みと白みの判定のそれぞれについて、5回の試行の平均値である blackPav と whitePav を、A の値(式(26))と組み合わせて使用し、blackPav = 0 と whitePav = 0 の両方が可能であるが、実験データでは観察することが出来なかった場合、(34)と(35)式を使用して白みと黒みの出力を計算した。

6.5 カテゴリカル色応答(CCR)の推定

R、G、B、および DaY 刺激のカテゴリカル色応答(CCR)を推定するために、式(1)から得られた値を使用した。(31)-(35)をカテゴリカラーコーディングレベルへの入力として使用し、11の基本色名にゲイン係数 K_i を適用し、各被験者に対して決定された値を適用した(表 5-4)。図 17(a)図番号おかしいは、中心窩での被験者 AK の推定カテゴリカル色応答(CCR)を示している。推定されたカテゴリカル色応答(CCR)は、円 1~5 のすべての刺激に対して非常に安定していた。他の2人の被験者についても、独自の K_i 値を使用してまったく同じ結果が得られた。表 6-3(b)-(d)は、約 20° の視野の鼻側の網膜での推定カテゴリカル色応答(CCR)を示している。ここで、3人の被験者すべての推定カテゴリカル色応答(CCR)は、円 1~5 のすべての刺激に対して非常に不安定であった。R はオレンジと赤、G は緑と黄色、B は青と紫、DaY は緑とオレンジのカテゴリカル色応答が得られた。

表 6-3. シミュレーションによる、被験者 AK、KF、KH それぞれの中心窩と視野の鼻側方向約 20° での推定 CCR

(a) 中心窩の推定AK, KF, KH						(c) 鼻側網膜20° の推定 KF					
円	1	2	3	4	5	円	1	2	3	4	5
R	赤	赤	赤	赤	赤	R	赤	橙	橙	橙	橙
G	緑	緑	緑	緑	緑	G	黄	緑	緑	黄	緑
B	青	青	青	青	青	B	紫	青	青	紫	青
DY	黄	黄	黄	黄	黄	DY	橙	黄	黄	橙	緑

(b) 鼻側網膜20° の推定 AK						(d) 鼻側網膜20° の推定 KH					
円	1	2	3	4	5	円	1	2	3	4	5
R	赤	橙	橙	赤	橙	R	赤	橙	赤	赤	橙
G	黄	緑	緑	緑	緑	G	黄	黄	黄	黄	緑
B	紫	青	青	紫	青	B	青	青	青	青	青
DY	橙	緑	黄	橙	緑	DY	黄	黄	黄	黄	黄

実験で使用した刺激はシミュレーションで使用したものと同じではなかったが、シミュレーションで得られたカテゴリーカル色応答 (CCR) の変動の程度を実験データのそれと比較することは非常に興味深い結果が得られる。表 6-4(a) は、既往研究で 0° で提示された刺激の被験者 AK の実験データ R1、G1、B1、DaY1 を示している。R1 と G1 の応答は完全に安定していたが、B1 と DaY1 では、5 回の繰り返しのうち 1 つのカテゴリーカル色応答 (CCR) が異なっていた。原色刺激のカテゴリーカル色応答 (CCR) が中心窩で強い一貫性を示すことは明らかであり、我々のシミュレーションはこの特性を予測している。先行研究での他の 2 人の被験者においても、これらの刺激に対して同程度の安定したカテゴリーカル色応答 (CCR) が得られた。周辺視のデータについて、3 人の被験者の視野の耳側方向で 20° で提示された刺激について得られた実験データを表 6-4(b) - (d) に示す。その場所では、カテゴリーカル色応答 (CCR) は各被験者内で不安定であった。たとえば、被験者 AK は、R1 の 4 つの異なる色名 (赤、オレンジ、ピンク、茶色) と 5 つの異なる色名 (緑) で応答した。DaY1 の場合は、灰色、ピンク、オレンジ、茶)。被験者 KF は、R1 の 4 つの色名と、他の刺激の 2 つの色名でも応答した。被験者 KH は、他の 2 人の被験者よりも高い一貫性を示した。

表 6-4 被験者 AK(a) に対し 0 度で提示された刺激に対する CCR の実験データ、および被験者 AK(b)、KF(c)、および KH(d) の視野の耳側方向 20°

(a) 0° の実験データ AK						(c) 耳側20° の実験データ, KF					
円	1	2	3	4	5	円	1	2	3	4	5
R	赤	赤	赤	赤	赤	R	橙	ピンク	赤	橙	橙
G	緑	緑	緑	緑	緑	G	緑	緑	緑	青	緑
B	紫	青	青	青	青	B	紫	紫	青	青	青
DY	黄	黄	黄	黄	橙	DY	緑	黄	黄	黄	緑

(b) 耳側20° の実験データ, AK						(d) 耳側20° の実験データ, KH					
円	1	2	3	4	5	円	1	2	3	4	5
R	橙	赤	ピンク	橙	茶	R	橙	橙	赤	赤	赤
G	緑	緑	茶	青	緑	G	緑	緑	緑	緑	緑
B	青	青	青	青	青	B	青	青	青	青	青
DY	緑	灰	ピンク	橙	茶	DY	灰	茶	茶	茶	茶

表 6-3 は、L 錐体と M 錐体のサイズの増加と周辺の密度の減少による局所的な不均衡、後続のチャンネルの変化、および反対色コーディングレベルとカテゴリカルカラーコーディングレベル間のネットワークリンクが変動を予測できるという仮定を用いることにより、同じ刺激に対する異なる被験者のカテゴリカル色応答 (CCR) が若干異なる結果を示している。我々のシミュレーションでは、網膜モザイクとそれに続く輝度 (luminance)、r/g、y/b のスペクトル関数は同じであるが、r/g 関数と y/b 関数の錐体重み係数と 11 基本色名のゲインに被験者間での違いがある。実験で得られた各被験者のカテゴリカル色応答 (CCR) の傾向、たとえば、被験者 KF は R1 に対してオレンジと答える傾向があり、被験者 KH または AK は R1 に対して赤と答える傾向を反映している。また AK や KF の DaY1 に対する一貫性のない応答 (表 6-4) も各々のシミュレーションに表れている。これらは、ゲイン係数 K_i がカテゴリカルカラーネーミングにおける個人差にどのように寄与するかを示している。

6.6 最新技術による生理学研究との比較

カラーネーミングと組み合わせた補償光学技術を使用した既往研究により、個々の錐体への光照射と色の見え応答との関係が明らかになっている^{80, 63, 81)}。これらの既往研究におけるスポットの直径は非常に小さく (30' 未満)、持続時間は非常に短かったため、不随意の眼球運動の影響を受けずに 1 つの錐体のみが活動可能な状況にされた。そのような小さくて短い刺激に対して、被験者は白と回答する場合もあるが時々色名で反応した。Hofer et al⁸⁰⁾ は、赤の応答率が、L 錐体が豊富な被験者の方が大きいことを示した。彼らはまた、L 錐体と M 錐体の相対比が 1 : 1 から離れるにつれて、

白応答の頻度が増加することを報告している。これらの発見は、錐体モザイクの変動、特に異なる被験者間の L 錐体比と M 錐体比の間の変動が、異なるカテゴリカル色応答 (CCR) の元の原因であることを示唆している。ただし、より大きな刺激サイズ (8 arc ') に対して行われたカテゴリカル色応答 (CCR) 予測は、すべての被験者に対して強い一貫性を持つ非常に安定したカテゴリカル色応答 (CCR) を示し、L 錐体比と M 錐体比の被験者間の違いがそのサイズの刺激のために⁶³⁾ カテゴリカル色応答 (CCR) に有意な影響を与えないことを示唆している。

我々の先行研究では、8 arc よりもはるかに大きい 0.5° 刺激のカテゴリカル色応答 (CCR) は、図 5-8 に示すように、周辺で被験者内および被験者間の大きな変動を示した。本研究では、異なる被験者には、r/g チャンネルと y/b チャンネルに異なる錐体重み係数を使用し、カテゴリカルカラーコーディングレベルで異なるゲイン係数を使用することにより、ネットワークモデルを使用したシミュレーションを使用した。したがって、同じ刺激に対する異なる被験者間での異なるカテゴリカル色応答 (CCR) は、主に、無彩色および有彩色の出力からカテゴリカルカラーネーミングへのコーディングが行われる網膜以降のプロセスで発生すると考えられる。一方、同じ刺激に対する被験者内の異なるカテゴリカル色応答 (CCR) は、受容体レベルでの L 錐体出力と M 錐体出力の間の変動の影響を受ける。

一般に、ディスプレイの原色 (R、G、B) は、中心視で見ると非常に飽和しているように見える。知覚的飽和は、図 5-2 に示すように、既往研究で使った R1 および B1 刺激に対しては約 70% 以上と評価されている。一方、単一錐体活性化によるカラーネーミングの結果は、常に赤と緑にそれぞれ応答する L 錐体と M 錐体は、調査した錐体数の半分未満しかないことを示した⁸¹⁾。このような色応答を示す錐体は少数派であり、同じ種類の錐体が塊っている場合によく見られた。L 錐体と M 錐体の大部分は、最も頻繁に白応答を誘発する。その中には L 錐体に囲まれた M 錐体や M 錐体に囲まれた L 錐体など、反対の錐体に囲まれた錐体が含まれる。以前はこれらが反対色チャンネルの色情報伝達を担っていると考えられていたが、今日ではこれらは、輝度情報を高い解像度で送信する役割を果たしていると考えられている。主観的評価で中心窩の飽和率が高いことを考慮すると、反対色チャンネルからカテゴリカル色応答レベルにおいて、何らかの増幅の可能性はある。

そして、第 2 章で記載した本研究の実験では Okajima らのネットワークモデルを視野内のさまざまな場所に提示された小視野刺激の色の見えに関する個々のデータに適用し、モデルが中心からの偏位を伴うカテゴリカル色応答 (CCR) 特性の個人差と変化を説明できるかどうかを調べた。各被験者について、55 の刺激のそれぞれに対してカテゴリカル色応答 (CCR) 推定が 5 回実行され、推定されたカテゴリカル色応答 (CCR) が 5 つの事例のうち少なくとも 3 つで同じでない場合は、不定が割り当てられた。すべての

被験者の13か所の場所すべてで、良好なパフォーマンス(不定応答を含む平均正解率77%)が得られ、さまざまな視野の位置で提示された小視野刺激に対するモデルの適用できることが示された。なおより正確な予測を取得するには、ピンク、茶色、白、灰色のより正確なデータが必要である。中心窩で得られたカテゴリカル色応答(CCR)は、3人の被験者で類似していたが、個人差は視野の位置とともに増加し、各カテゴリカル色応答(CCR)のゲイン制御に異なる係数を採用したため、ネットワークモデルは周辺のこのような被験者間の違いを予測することができた。

色相、知覚的飽和度、および黒と白を測定するためのより簡単な方法が開発された場合、中心窩だけでなく周辺部でも、ネットワークモデルを使用して任意の色刺激に対する被験者のカテゴリカル色応答(CCR)を推定できる。また、中心窩と約 20° の周辺部に錐体モザイクを構築し、LMS錐体の線形結合を仮定して輝度チャンネルと反対色チャンネルの出力を推定した。次に、4つのLCD刺激(R、G、Bの原色と同じ輝度のDaY)の3つのチャンネルの出力を、固定位置の変化を考慮しながら、さまざまな領域について計算した。これらの出力をネットワークモデルへの入力として利用して、中心窩と周辺部の最終的なカテゴリカル色応答(CCR)が取得された。中心窩では、カテゴリカル色応答(CCR)は4つの刺激すべてに対して一定であった。一方、それらは周辺シミュレーションのすべての刺激に対してある程度変化した。周辺網膜の錐体のまばらさは、L錐体とM錐体の相対数の変動をもたらし、それが輝度と反対色チャンネルの変化をもたらすことが示唆されている。それにより、周辺に提示された小視野刺激に対する同じ刺激に対するカテゴリカル色応答(CCR)の変動につなげることができる。

第7章 ファインダーへの応用

7.1 ファインダーの視認性の既往研究

本章では第2～4章での基礎的知見の応用としてファインダーの文字情報の視認性に関する実験とその結果について述べる。

画像と文字情報との同時表示は、カメラのファインダー、Head Mounted Display の略である「HUD」、Augmented Reality の略の「AR」、Virtual Reality の略である

「VR」、Mixed Reality の略である「MR」、もしくは、これらの総称である xR などに用いられている。そして、無彩色および有彩色文字刺激の可読性に関しては多くの既往研究がある^{82)~94)}。また、周辺視で見たときの色知覚の低下についての研究がいくつか報告されている^{11, 64)}。

舟川ら⁸⁸⁾は、文字の視認性に関する定量化の一手法であるローパス フィルタリング手法を提案した。実験は暗室内両眼視で行われた。この手法はある視覚パターンから用いてそれを構成する空間周波数成分を高い方の周波数成分から順次取り除いていくことで次第に文字の形状がぼやけていく過程を、この形状がわからなくなる程度になるまでの臨界値が存在していること実験で明らかにした。また視覚パターン特徴付けている空間周波数帯があり、その帯域における周波数成分のコントラストとその帯域における観察者が観察したときのコントラストの感度の結果から一義的に視覚パターンが認識できるかどうかを予測することが可能であるとの報告がなされている。また、ローパス・フィルタリング法では、あるカットオフ周波数による刺激形状の認識精度を測定することで認識が可能な範囲から文字の視認性の評価を行っており、文字、背景、色等のパラメーターを変化させたときの変化に関する報告がなされている。

また舟川⁸⁴⁾は文字表示の見やすさやわかり易さに対する社会的要請を背景として表示されている文字のサイズ、輝度、コントラストの差、背景と文字の色コントラストや線幅、コントラスト、の効果を実験結果から考察している。実験は暗室内両眼視で行われている。まず、中心視の範囲内では文字サイズがN倍になると読み取りに必要な視力は $1/N$ に低下し、単独の数字の場合は訳 2 cycle/letter までの空間周波数で数字の認識が可能であることを報告している。また、背景輝度とコントラストの効果に関する実験では明所視条件下においては、コントラストが0.4以上であれば可読性が安定する結果を報告している。そして、コントラストが0.9程度あれば広範な範囲にて安定した可読性が得られ、線幅の効果の実験においては文字高の12%から16%程度の時に可読性が高くコントラストの低下の影響が受けにくいという興味深い結果が得られている。

舟川⁸⁵⁾はさらに、情報表示のみやすさとわかり易さの観点において社会的な要請が高まっている背景から、色コントラストと輝度コントラストの視認性に関する実験を行っている。実験は暗室内両眼視で行われた。実験の結果、無彩色の背景上での有彩色文字であっても、有彩色背景上での無彩色の文字であっても赤緑に比べて黄青の可読性が低くなる結果を報告している。また、有彩色の背景上で有彩色の文字表示を行った場合、赤緑の文字では文字と背景の間で色差が大きくなるほど可読性が高くなるが、黄色文字では赤青より緑背景、青文字では緑黄より赤背景での可読性が高くなる結果を報告している。

岩井、岡嶋ら⁸⁹⁾は、文字に対する可読性の評価は商品の仕様や照明の設計手法へとつながる重要な評価項目であるとし、背景輝度、文字の大きさの観点での実験結果を報告している。実験は輝度が一樣な調光可能な室内および両眼視で行われた。結果、背景輝度、文字サイズを変数とし、視認性評価関数を考案し、この関数と実験結果の整合性についての検討を行っており、高精度に記述された関数であることが報告されている。

原、野口ら⁹⁰⁾は、無彩色背景有彩色文字の明度、知覚的飽和度、色相が読みやすさに与える影響を調査した。実験は暗室内両眼視で行われた。実験の結果から、色の対比が読みやすさを向上させる効果は輝度コントラストが大きいほど小さいことが示された。色相の影響については、CIELAB 色差が同一であるにも関わらず、ab 色相角により読みやすさは異なり、輝度コントラストが大きな条件になるほどこの ab 色相角による読みやすさの差異がなくなることが明らかとなった。知覚的飽和度の影響については、ab クロマ差が大きいと ab 色相角による読みやすさの差異は増大し、ab クロマ差が小さいと差異が減少することが示された。

7.2 ファインダーへの応用の目的

7.1 で紹介した研究はすべて暗室の中であったことと更に岩井、岡嶋ら⁸⁹⁾は輝度が一樣な調光可能な室内で行われ、上記以外はすべて暗室両眼視で行われた実験であった。しかしながら、ミラーレス一眼レフ等に搭載されているファインダーを使用する場合を考えると、利き目を使用したもの（だいたいの被験者は右目であった）、明るい場所でカメラを撮影する状況が多いことがわかっている。そのため、ファインダーの視認性に関する評価を行う際には明所視環境でかつ単眼を用いた実験が必要である。また、既往研究は文字サイズや背景とのコントラスト差に着眼した実験結果が多いが、今回のようなカメラを想定したファインダーへの応用を踏まえた実験を想定した場合、撮影した写真内に文字情報が重なって表示されたりする場合が想定されたり、ファインダーを覗いて一度被写体にピントを合わせた後にシャッタースピード等の文字

情報を確認するように視線を移動させた場合が想定される。そのような状況での視認性に関する既往研究は調査した限りではない。

以上を踏まえ、本研究では、主としてファインダーでの文字表示を想定し、画像辺縁部に提示された文字情報の可読性に対する文字色、輝度、提示場所の影響を明らかにすることを目的としている。そして、ファインダー環境下で文字の色、表示場所の違いが情報表示の視認性に与える影響を調査し、ファインダーの情報表示に適した表示の色、表示場所を実験的に検討することが本研究の目的である。

7.3 実験概要

本研究での実験概要を以下に示す。ファインダーを再現した環境で周辺に文字列を配置した画像を提示し、被験者は見えた文字列を回答する。文字列の表示場所・輝度・色の組み合わせ条件が変化し、被験者は周辺に文字列を表示した画像を提示し、見えた文字列を回答させている。実験は、文字列の輝度を変化させる輝度影響実験と、文字列の色を変化させる色影響実験に分けて実施した。一つ目の輝度影響調査実験では、文字の輝度が視認性に与える影響を調査するために、文字の輝度のみを変化させ、二つ目の色影響調査実験では、文字の色が視認性に与える影響を調査するために、文字の色のみを変化させている。

7.4 実験装置

次に実験装置について図 7-1 に記載された内容に基づき説明する。輝度影響実験及び色影響実験はどちらの実験で同じ環境下で行っている。被験者の 400mm 前方に刺激呈示用のディスプレイを設置し、視野を画面だけに制限するために、そのディスプレイを黒色フードで覆っている。被験者の右目直近での鉛直面照度が 600lux、水平面照度が 760lux であった。また、今回の実験はファインダーを想定しているが、ファインダーが搭載されているカメラは明視環境で使用されることも多いため実験室の室内照明を点灯した状態で行っている。

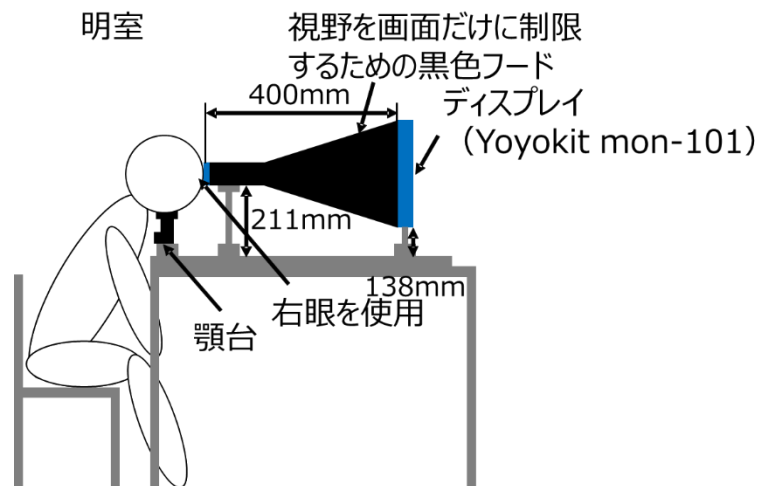


図 7-1. 実験装置

7.5 実験刺激

本実験で使用した実験刺激について説明する。図 7-2 は実験で使用した刺激の模式図を示す。まず、背景画像の上にアルファベットと数字をランダムに組み合わせた 5 字の文字列を表示したものを刺激として使用している。表示場所は上左、上中央、上右、下右、下中央、下左の 6 か所とし、この図のような刺激をディスプレイに表示し、実験装置を通して、被験者に 450ms 間提示している。また、ディスプレイの表示領域は縦 125 mm、横 167mm であった。さらに、意味のある文字列とならないように、文字列にはアルファベットと数字を交互に配置した。0 と O、1 と I は被験者にとって判別が難しいため使用しなかった。9 と Q は被験者がどちらの文字として答えているか判別できないため、使用しなかった。また、フォントには Arial を使用した。黒帯輝度は 0.08cd/m^2 、背景画像の平均輝度は cat 画像が 113.8cd/m^2 、coffee 画像が 94.9cd/m^2 、cheese が 108cd/m^2 であった。測定はコニカミノルタの CA-2500 を使用した。文字サイズは高さが 0.86° 横幅は $1.10\sim 0.47^\circ$ の範囲であった。これは一文字あたりの幅で表示文字によって異なるためで横幅最小が J であり、横幅の最大は W であった。輝度影響実験で使用した提示刺激の例を図 7-3 に示す。文字の色は無彩色を使用し、文字の輝度は 5cd/m^2 、 10cd/m^2 、 30cd/m^2 、 160cd/m^2 の 4 種類、背景画像は cat、coffee、cheese の 3 種類、表示場所は上左、上中央、上右、下左、下中央、下右の 6 か所に提示した。また、1 条件につき 3 回で計 216 試行を 2 回に分けて行っている。

次に色影響実験で使用した提示刺激の例を図 7-4 に示す。文字の色は白、黄、緑、赤の 4 種類を使用した。背景画像は白 (coffee)、黄 (pine)、緑 (leaf)、赤 (berry)、多色 (beans) の 5 種類、表示場所が 6 か所、計 120 試行で行っている。画像名称は白 (coffee)、黄 (pine)、緑 (leaf)、赤 (berry)、多色 (beans) の 5 種類とした。また、文字の

輝度は 30cd/m^2 に設定した。背景画像の平均輝度は白 (coffee) が 94.9cd/m^2 、黄 (pine) が 55.1cd/m^2 、緑 (leaf) が 26.0cd/m^2 、赤 (berry) 18.1cd/m^2 、多色 (beans) 46.8cd/m^2 であった。また、色の影響をみるため画像周辺の黒の表示枠はなしにしている。

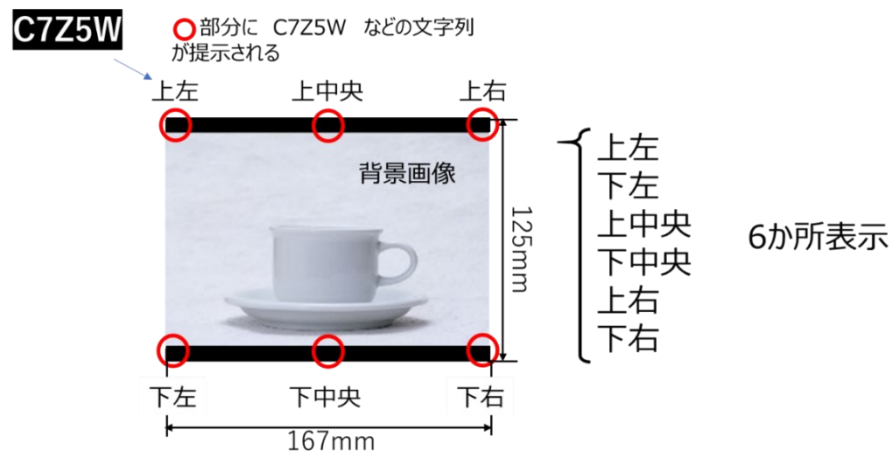


図 7-2 実験で使した刺激の模式図









文字色	輝度(cd/m^2)	背景画像
無彩色	5	<div>白</div> <div>  </div> <div>cat coffee cheese</div>
	10	
	30	
	160	

図 7-3 輝度影響提示刺激

文字色	輝度(cd/m^2)	背景画像
白	30	<div> 白(coffee), 黄(pine), 緑(leaf), 赤(berry), 多色(beans)</div> <div>   </div>
黄	30	
緑	30	
赤	30	

計120試行

図 7-4 色影響提示刺激の例

7.6 実験手順

次に、実験手順を示す。最初に1分間グレー画像を表示することで被験者の眼を順応する作業を行っている。この画像は約55cd/m²であった。次に次の作業では色影響調査実験では10試行、輝度影響調査実験では1回につき3試行ずつ練習を行った。それぞれで練習の回数が異なるのは、最初に色影響実験を実施しているためであり、かつ最初の実験では被験者が実験になれさせるためである。1練習が終了したのちにそれぞれの本試行へと移行している。練習本試行は以下の順に実験を行っている。最初に被験者にグレー画像を表示させ、次に、固視点を表示させている。そして固視点が徐々にフェードアウトさせて、次に、固視点が完全に消失する。次にビーブ音を鳴らしている。次に文字列を表示させている。なお、表示させた文字列はランダムに表示されるようにあらかじめプログラミングを行っている。図7-5の場合はH6W8Kと表示させている。この文字列の表示時間は450msecである。次に最初のグレー画像を表示させ、この際に被験者は文字列を回答するようにした。また、文字列が表示された際に被験者は文字が表示されている位置に視線を移動させてもよいことにしている。これはカメラのファインダーを観察している際に、一度画面内でピントを合わせた際に文字情報に視線を移動させる可能性があることからこのように設定している。この動作はいいかえると被験者が一度周辺視で情報をとらえてそののち視線を移動させて中心視で文字情報を確認している動作に相当している。また、試行回数以外の実験内容は色影響実験及び輝度影響実験において同じ手順で行っている。

7.7 被験者

被験者は20歳代の男性5名女性5名の計10名で行った。全員色覚正常者で、被験者すべてが正常もしくは正常に矯正された視力があることがわかっている。

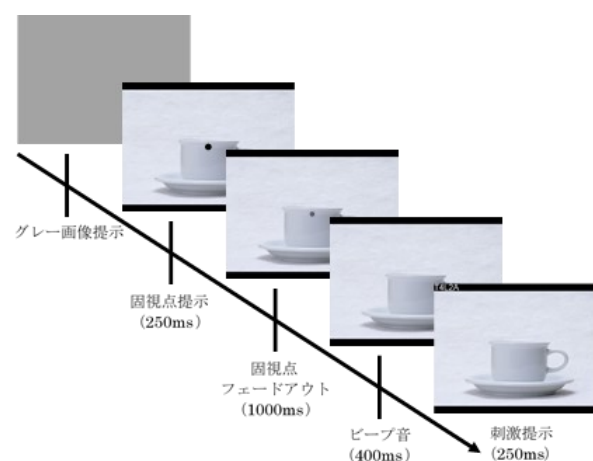


図 7-5 実験手順

7.8 正答率の算出方法

次に本研究における正答率の算出方法について表 7-1 に示す。まず初めに、表示場所のみ正解の場合は読めない応答として記録した。また、表示場所も分からない場合は見えない応答として記録した。どちらの場合も正答率・準正答率は 0 として記録した。さらに、正解文字列と回答文字列の順番と文字の両方が一致したものを正答としてカウントした。また、1 試行ごとに正答率を算出し、回答文字列の順番と文字の両方が正解文字列と一致していたものを正答とした。1 文の字正答が正答率 20%分に相当としている。また、正答、準正答以外に見えない、読めない応答を記録した。

文字列の回答の際、1 文字も分からなかった場合は文字列の場所を回答してもらい、表示された場所も分からなかった場合は見えないまたは、分からないと答えてもらった。表示場所が正解の場合を読めない応答とし、不正解のときと見えない、分からないと回答したときを見えないとした。また、文字を回答しても、回答文字列に正解文字が 1 文字もない場合も読めない応答とし、読めない見えない応答のどちらも、正答率・準正答率は 0 とした。

表 7-1 見えない回答例

回答例	正解文字数	正答率 (%)
見えない	0	0
○○○○V	1	20
S○○○V	2	40
S3○5○	3	60
S3H○V	4	80
S3H5V	5	100

7.9 輝度影響実験の結果

輝度影響実験の結果を示す。図 7-7 は縦軸が正答率を示し、横軸が左側から順に上左、下左、上中央、下中央、上右、下右の表示場所を示したグラフである。また縦方向のバーは、標準誤差を示し、凡例の色は輝度を示し、上から順に 5、10、30、160 の順で並んでいる。結果として、正答率は中央で向上し、上右で低下した結果となり、輝度が高いほど正答率は向上する結果となった。また、分散分析の結果、提示場所、文字輝度で有意差が得られた ($p < .01$)。また、提示場所×文字輝度の交互作用が得られた ($p < .01$)。

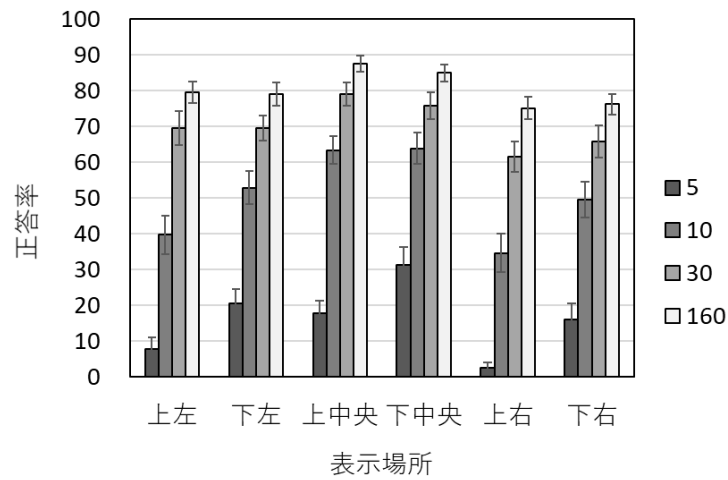


図 7-7 輝度影響調査実験 提示場所毎の正答率

次に輝度に対する上部と下部における文字列の正答率の比較の結果を図 7-8 に示し縦軸は正答率を示し、横軸が輝度を表している、左図は上左、上中、上右の上側 3 か所。右図は下左、下中、下右の下 3 か所の結果を表している。実験の結果下側より上側が正答率高く、右側より左側が正答率高い視線移動が左側にいきやすいことがわかっている。文字輝度の増大につれて正答率は急激に上昇する傾向である。他の 4 か所のもほぼ同様の結果であった⁹⁵⁾。

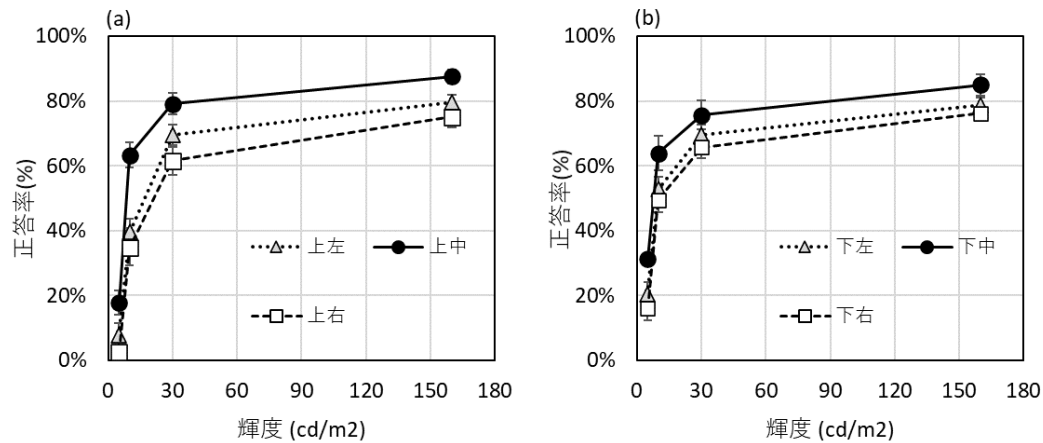


図 7-8 輝度影響調査実験 正答率

7.10 色影響実験の結果

色影響実験の結果の正答率と色差の結果を図 7-9 に示す。縦軸が正答率、横軸が背景画像の色を表しており、左が上中央(もしくは上中)、右図が上右を表している。棒グラフはそれぞれ白文字、黄文字、緑文字、赤文字を表している。また、色影響実験の結果の正答率と色差の結果を示し、縦軸が正答率、横軸が背景画像の色を表している。上中央、上右の結果を表している。実験の結果、全体的な正答率は上中央(もしくは上中)の方が上右より高い結果を示し、赤画像での赤文字正答率は低くなっており、緑画像での緑文字の正答率は低い結果を示している。

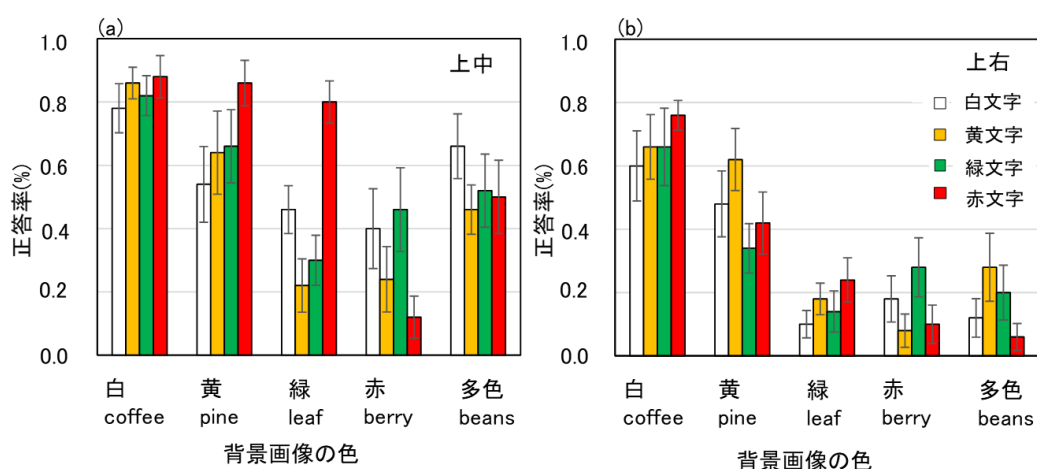


図 7-9 文字列の提示場所・色ごとの結果

次に色影響実験の結果(正答率と重みづけ色差)の結果を図 7-9 に示す。縦軸が正答率、横軸は図 7-10(a):重みづけ色差の結果、図 7-10(b):色差の結果を表す。重みづけ色差の近似式はこちらに記載した式で近似した。色差の式はこちらの式で計算している。結果は輝度差に重みづけするとある程度相関を確認することができた結果を示し、相関係数が 0.74、右図の相関係数が 0.32 となった。次に、色影響実験の結果(正答率 vs 重みづけ色差)の結果を図 7-10(c)に示す。縦軸が正答率、横軸は左図が重みづけ色差の結果右図が輝度差の結果を表している。輝度差のみより重みづけ色差の方が高い相関背景色と文字色の差もある程度の影響あり左図の相関係数が 0.74, 右図の相関係数が 0.50 となった。

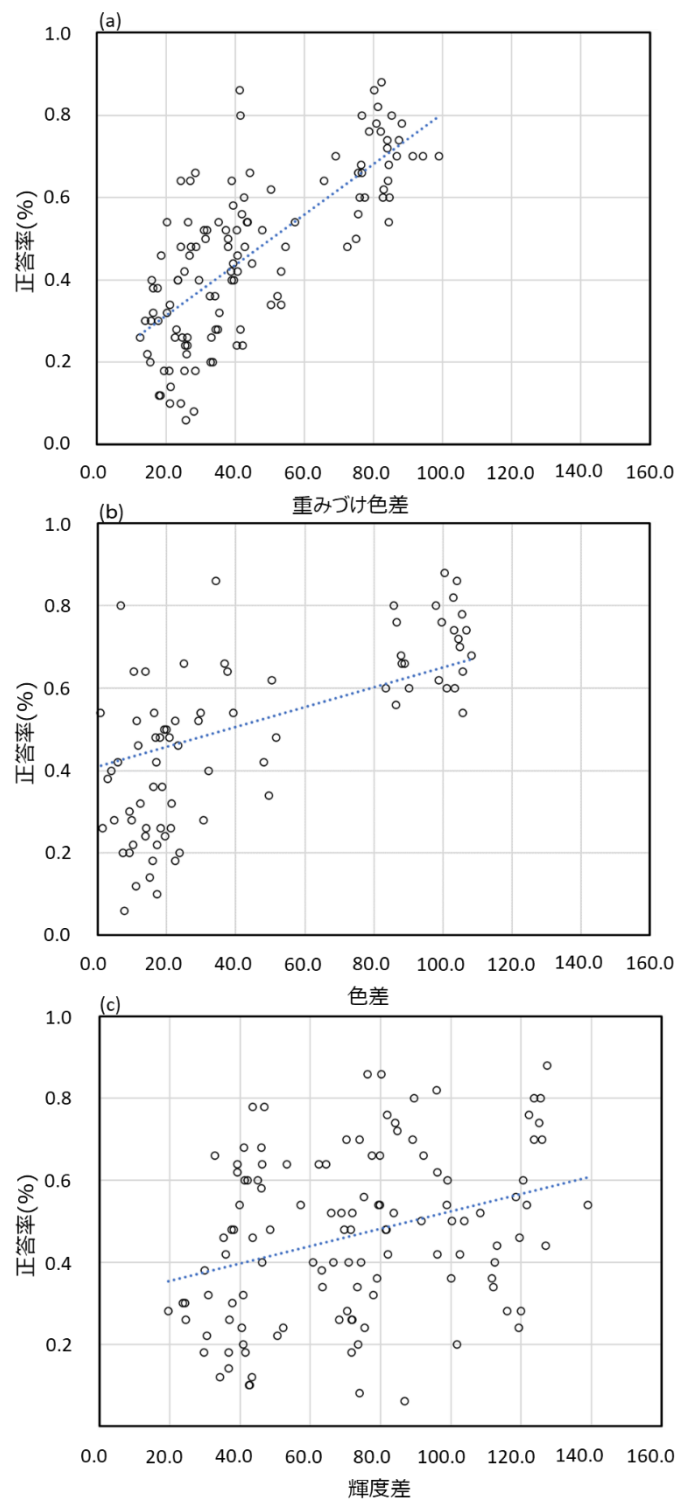


図 7-10 色影響実験の結果(正答率と重みづけ色差)の結果

7.11 ファインダーへの応用のまとめ

本研究では、画像辺縁部に提示された文字情報の可読性に対する文字色、輝度、提示場所の影響を明らかにするために輝度影響実験と色影響実験を実施している。輝度影響実験では正答率は中央で高く、上右で低い結果となることがわかっている。また、輝度が高いほど正答率が高く、下側より上側が正答率高く、右側より左側で正答率高い結果となっている。また、輝度影響実験の結果から、十分な可読性には 30cd/m^2 以上が必要であることが示された。色影響実験では、全体的に上中央より上右の方が正答率低い輝度差のみより重みづけ色差の方が高い相関背景色と文字色の差もある程度の影響があることがわかった。これらの結果は、Sakurai ら¹¹⁾の研究では、視野上側、視野の鼻側よりも視野下側、視野の耳側で広く色刺激の同定が可能だったと報告している。視野の鼻側と視野の耳側の比較では本研究と整合しない結果となっているが、上側よりも下側の方が広い範囲で刺激が検出されたという点は本研究と一致している。

視線を移動する際の左右で非対称性が生じていることに関しては、Vergilino-Perez ら⁹⁶⁾は、サッカードでの左右非対称性は、反応する時間には影響を及ぼさず、振幅と速さに影響がみられたと報告されている。ただしこのサッカードに関しては利き目が影響しているのか、もしくは視野の位置に影響しているのか（鼻側方向、耳側方向）に関しての実験結果に着目してみると、被験者間で異なる結果が得られたとの報告がなされている。また、一定の方向に注視した際の左右の非対称性に関しては Foulsham ら⁹⁷⁾の研究ではほぼ全員の被験者で左方向に視線を移動させることが報告されている。そのため、実験の方法によっては右側の情報表示を見落としてしまうことが示唆されている。このような傾向を示す実験結果は他にも複数報告がなされている⁹⁸⁻⁹⁹⁾。さらには、画像色影響実験において、文字の色が赤と緑で、各々 red の背景画像、green の背景画像それぞれの実験結果で正答率の低下がみられる。この結果に関しては今回使用したすべての文字、すべての文字近傍の色差の影響を改めて考察する必要がある。また、輝度影響実験、色影響実験ともに、文字情報が提示されている箇所により正答率の違いがみられており、上側では中央が高く右側方向が低い結果となり、下側でも中央で正答率が高く右側方向の正答率が低い高い結果となっている。これらは左側のバイアスがあるとの既往研究の結果^{100, 101)}から再検討を要する課題であると認識している。

第8章 結論

8.1 色の見え測定実験結果のまとめ

本研究では、周辺視に提示された小視野色刺激の色の見え測定において、以下の結果が得られた。色刺激は直径 0.5° の円形で、55 種の色度刺激群である。視野中心 (0°) および垂直方向と水平方向に沿って 3 種の中心からの偏位 (視野位置 5° 、 10° 、 20°) で提示された。合計 13 か所である。色の見えは、基本色である赤、黄、緑、青の比率による色相、知覚的飽和度、および白みと黒みの判定、およびカテゴリカルカラーネーミングという 2 つの方法を使用した。前者は一般的にはエレメンタリーカラーネーミングと呼ばれている手法であり、ここで得られる有彩色の応答をユニーク赤、ユニーク黄、ユニーク緑、ユニーク青成分と呼ぶ。後者の手法で得られる色名応答をカテゴリカル色応答 (CCR) と呼ぶ。被験者は正常な色覚をもった 3 名であった。

実験の結果より、赤みがかった刺激と緑がかった刺激の知覚的飽和度の低下と黄色への色相のシフトが見られた。これらの傾向は、同じ中心からの偏位 (視野位置) の視角 1.85° 直径の刺激よりも顕著であった。 0° でのカテゴリカルカラーネーミングの結果は、直径 2° の刺激を使用した既往研究の結果とほぼ同じ結果を示した。中心からの偏位 (視野位置) 増大に伴うカラーネーミングの悪化 (すなわち被験者内での一貫性や被験者間での一致性が低下すること) は、視野の上側方向に提示された刺激に対して最も顕著であった。これに対し、視野の耳側方向ではその低下が最も緩やかであった。

色相と知覚的飽和度の判定における色相応答とカテゴリカルカラーネーミングの関係は、本研究で測定された場所ではほぼ同じ結果を示した。すなわち両者の関係は網膜位置で変化せず、カテゴリカルカラーネーミングでの「緑」「黄」「青」応答を引き出すのに必要なユニーク緑、ユニーク黄、ユニーク青成分は刺激提示の中心からの偏位 (視野位置) によらずほぼ一定であった。ただし、「赤」の色名を引き出すために必要なユニーク赤成分は他の原色よりも大幅に高く、特に 0° で高くなった。すなわち中心視で見ている対象を「赤」と色命名するには十分なユニーク赤成分が必要だということが示された。これは「赤」の特異性を示唆している。

8.2 ネットワークモデルによる推定のまとめ

本研究では、Okajima らのネットワークモデルを視野内のさまざまな場所に提示された小視野刺激の色の見えに関する個々のデータに適用し、ネットワークモデルが視野位置に伴いカテゴリカル色応答 (CCR) 特性の個人差と変化を説明できるかを調査した。各被験者について、55 刺激のそれぞれに対しカテゴリカル色応答 (CCR) 推定が 5

回実行され、推定されたカテゴリーカル色応答 (CCR) が 5 つの事例のうち少なくとも 3 つ以上同じものではなかった場合には、不定ラベルを割り当てた。そして、すべての被験者の 13 の視野位置のすべてにおいて、不定応答含めて良好な推定ができ、平均正解率で 77% が得られた。これにより、 0° の実験結果に基づいて構築されたモデルであるが、さまざまな視野位置に提示された小視野刺激に対しても適用できることが示された。さらに正確な予測を取得するには、本研究でカテゴリーカル色応答 (CCR) の数が少なかつたピンク、茶色、白、灰色に関するより正確なデータが必要である。

中心窩で得られたカテゴリーカル色応答 (CCR) は、3 人の被験者間で類似していたが、個人差は視野位置が変化するとともに増加する傾向を示した。本件研究で用いたネットワークモデルでは、各々の被験者において、各カテゴリーカル色応答 (CCR) のゲイン制御に異なる係数を採用することにより被験者間での違いを予測することができた。今後、色相、知覚的飽和度、黒み、白みをより簡単に測定する方法が開発された場合には、視野中心だけでなく視野周辺部に提示された刺激視野でも、ネットワークモデルを使用して任意の色刺激に対する被験者のカテゴリーカル色応答 (CCR) を推定できる可能性を示した。

刺激提示の偏位が増大するとカテゴリーカル色応答 (CCR) は不安定になる。すなわち同一被験者に同一刺激を提示しても異なるカテゴリーカル色応答 (CCR) となる場合が増える。この原因を推測するために、中心視と耳側周辺約 20° における錐体モザイクを構築し、LMS 錐体の線形結合を仮定し、輝度チャンネルと反対色チャンネルの出力を推定した。次に、4 つの色刺激 (ディスプレイの R, G, B 原色と、同じ輝度の DaY) に対して、前述の 3 つのチャンネルの出力を、人間の固視微動の変化を考慮しながら、さまざまな領域について計算し、これらの出力をネットワークモデルへの入力として利用することで、中心視と周辺視の最終的なカテゴリーカル色応答 (CCR) を取得した。そして中心窩 (提示位置 0°) では、CCR は 4 つの刺激すべてに対し固視微動を考慮した 5 か所において一定の応答、すなわち「赤」「緑」「青」「黄」というカテゴリーカル色応答 (CCR) が得られたが、周辺視シミュレーションではすべての刺激に対して場所の微少な変動によりカテゴリーカル色応答 (CCR) がある程度変化する結果となったすなわち網膜周辺部における錐体分布の粗さは、小視野刺激がカバーする領域内の L 錐体と M 錐体の相対数の変動をもたらし、それが輝度と反対色チャンネルの変化をもたらすことが示唆される。それが周辺に提示された小視野刺激での同じ刺激に対するカテゴリーカル色応答 (CCR) の変動につながっている可能性が示された。

8.3 ファインダーへの応用のまとめ

本研究では、画像辺縁部に提示された文字情報の可読性に対する文字色、輝度、提示場所の影響を明らかにするために、輝度影響実験と色影響実験を実施した。まず、輝度影響実験では正答率は、輝度が高いほど正答率が高く、下側よりも上側での正答率高くなり、右側より左側で正答率高い結果となった。また、十分な可読性を得るには 30cd/m^2 以上が必要であることが実験の結果示され、色影響実験では、輝度差のみより重みづけ色差の方が高い相関性を示し、背景色と文字色の差もある程度において文字の可読性の影響を文与えるあることがわかった。さらには、両方の実験結果において、提示場所の影響がみられ、特に、上下とも中央が高く右側で低い成績とることがわかった。そして、画像観察時での視線移動では left bias があるとの研究が報告されているため、サッケードや注意の方向特性との関係を検討する必要がある。

また、第2章から3章での実験結果の知見から本研究では色影響の違いが得られることを期待していたが実際の結果をみると、輝度影響実験の影響が強く出ており、色影響実験の結果があまり見られなかった。この原因としては、背景色原因として考えられることとしては、背景画像の平均輝度が色毎に異なっていたためと考えられる。実際に測定した背景画像の平均輝度は白 (coffee) が 94.9cd/m^2 、黄 (pine) が 55.1cd/m^2 、緑 (leaf) が 26.0cd/m^2 、赤 (berry) 18.1cd/m^2 、多色 (beans) 46.8cd/m^2 であり、背景画像の平均輝度が色毎に異なっていたためと考えられるためと考えられる。

参考文献

- 1) Boynton RM, Schafer W, Neun ME. Hue-wavelength relation measured by color-naming method for three retinal locations. Science 1964;146:666-668.
- 2) Weitzman DO, Kinney JAS. Effect of stimulus size, duration and retinal location upon the appearance of color. J. Opt. Soc. Am. 1969;59(5):640-643.
- 3) Stabell B, Stabell U. Rod and cone contributions to peripheral colour vision. Vision Res. 1976;16(10):1099-1104.
- 4) Gordon J, Abramov I. Color vision in the peripheral retina. II. Hue and saturation. J. Opt. Soc. Am. 1977;67(2):202-207.
- 5) Abramov I, Gordon J, Chan H. Color appearance in the peripheral retina: effects of stimulus size. J. Opt. Soc. Am. A 1991;8(2):404-414.
- 6) Abramov I, Gordon J, Chan H. Color appearance across the retina: effects of a white surround. J. Opt. Soc. Am. A 1992;9(2):195-202.
- 7) Stabell B, Stabell U. Peripheral colour vision: effects of rod intrusion at different eccentricities. Vision Res. 1996;36(21):3407-3414.
- 8) Stabell U, Stabell B. Rod-cone color mixture: effect of size and exposure time. J. Opt. Soc. Am. A 1999;16(11):2638-2642.
- 9) Sakurai M, Koseki T, Hayashi H, Ayama M. Color appearance in peripheral vision: Effects of test stimuli and surround luminance. J. Light & Visual Env. 2002;26(3):9-18.
- 10) Ayama M, Sakurai M. Changes in hue and saturation of chromatic lights presented in the peripheral visual field. Color Res. Appl. 2003;28(6):413-424.
- 11) Sakurai M, Ayama M, Kumagai T. Color appearance in the entire visual field: color zone map based on unique hue component. J. Opt. Soc. Am. A 2003;20(11):1997-2009.

- 12) Abramov I, Gordon J. Seeing unique hues. J. Opt. Soc. Am. A
2005;22(10):2143-2153.
- 13) McKeefry DJ, Murray IJ, Parry NRA. Perceived shifts in saturation and hue
of chromatic stimuli in the near peripheral retina. J. Opt. Soc. Am. A
2007;24(10):3168-3179.
- 14) Volbrecht VJ, Nerger JL. Color appearance at $\pm 10^\circ$ along the vertical and
horizontal meridians. J. Opt. Soc. Am. A 2012;29(2):A44-A51.
- 15) Stabell B, Stabell U. Rod and cone contributions to change in hue with
eccentricity Vision Res. 1979;19(10):1121-1125.
- 16) Nerger JL, Volbrecht VJ, Ayde CJ. Unique hue judgements as a function of
test size in the fovea and at 20-deg temporal eccentricity. J. Opt. Soc.
Am. A 1995;12(6):1225-1232
- 17) Williams D, MacLeod DIA, Hayhoe MM. (1981). Foveal tritanopia. Vision Res.
1981;21(9):1341-1356.
- 18) 矢野 正, 矢口 博久, 三宅 洋一, 久保 走一: 小視野における色覚特性, 光学.
1989;18(8):425-433.
- 19) 高松 衛, 中嶋 芳雄, 神谷 佳: カラーネーミング法を用いた極微小視角における
知覚色評価. 映像メディア学会誌. 2001;55(10):1298-1300.
- 20) Strasburger H, Rentschler I, Jüttner M. Peripheral vision and pattern
recognition: A review. J Vision, 2011;11(5) 13:1-82.
- 21) Technical report CIE211; Colour appearance in peripheral vision. Commission
Internationale de l'Eclairage.;2014.
- 22) Gordon J, Abramov I. Scaling procedures for specifying color appearance.
Color Res. Appl. 1988;13(3):146-152.
- 23) Gordon J, Abramov I, Chan H. Describing color appearance: Hue and
saturation scaling. Percept Psycho 1994;56(1):27-41.
- 24) Berlin B, Kay P. Basic color terms: Their universality and evolution.
Berkeley, CA: University of California Press.;1969.

- 25) Boynton RM, Olson CX. Locating basic colors in the OSA space. *Color Res. Appl.* 1987;12(2), 94-105.
- 26) Uchikawa K, Boynton RM. Categorical color perception of Japanese observers: comparison with that of Americans. *Vision Res.* 1987;27(10):1825-1833.
- 27) Boynton RM, Fargo L, Olson CX, Smallman HS. Category effects in color memory. *Color Res. Appl.* 1989;14(5):229-234.
- 28) Boynton RM, Olson CX. Salience of chromatic basic color terms confirmed by three measures. *Vision Res.* 1990;30(9):1311-1317.
- 29) Uchikawa K, Kuriki I, Shinoda H. Categorical color-name regions of a color space in aperture and surface color modes. *J Light & Visual Env.* 1996;20(1):26-35.
- 30) 瀬川かおり, 内川恵二, 栗木一郎: 周辺視野におけるカテゴリーカル色知覚. *照明学会誌.* 1999;83(11):860-868.
- 31) Okajima K, Robertson AR, Fielder GH. A quantitative network model for color categorization. *Color Res. Appl.* 2002;27(4):225-232.
- 32) Ishida T. Color identification data obtained from photopic to mesopic illuminance levels. *Color Res. Appl.* 2002;27(4):252-259.
- 33) Bonnardel V. Color naming and categorization in inherited color vision deficiencies. *Vis Neurosci* 2006; 23(3-4):637-643.
- 34) Olkkonen M, Hansen T, Gegenfurtner KR. Categorical color constancy for simulated surfaces. *J Vision*, 2009;9(12) 6:1-18.
- 35) Olkkonen M, Witzel C, Hansen T, Gegenfurtner KR. Categorical color constancy for real surfaces. *J Vision*, 2010;10(9) 16:1-22.
- 36) Ma R, Liao N, Yan P, Shinomori K. Influences of lighting time course and background for categorical colour constancy with RGB-LED light sources. *Color Res. Appl.* 2019;44(5):694-708.

- 37) Mylonas D, Macdonald L. Augmenting basic color terms in English. *Color Res. Appl.* 2015;41(1):32-42.
- 38) Paggetti G, Menegaz G, Paramei G. Color naming in Italian language. *Color Res. Appl.* 2016;41(4):402-415.
- 39) Kuriki I, Lange R, Muto Y, Brown AM, Fukuda K, Tokunaga R. The modern Japanese color lexicon. *J Vision*, 2017;17(3) 1:1-18.
- 40) Paramei G, Griber YA, Mylonas D. An online color naming experiment in Russian using Munsell color samples. *Color Res. Appl.* 2018;43(3):358-374.
- 41) Knau H, Werner JS. Senescent changes in parafoveal color appearance: saturation as a function of stimulus area. *J. Opt. Soc. Am. A* 2002;19(1):208-214.
- 42) Abramov I, Gordon J. Color vision in the peripheral retina. I. Spectral sensitivity. *J. Opt. Soc. Am.* 1977;67(2):195-202.
- 43) Stabell B, Stabell U. Extrafoveal spectral sensitivity during dark adaptation. *J. Opt. Soc. Am.* 1980;70(1):81-86.
- 44) Stabell B, Stabell U. Absolute spectral sensitivity at different eccentricities. *J. Opt. Soc. Am.* 1981;71(7):836-840.
- 45) Kuyk TK. Spectral sensitivity of the peripheral retina to large and small stimuli. *Vision Res.* 1982;22(10):1293-1297.
- 46) Technical report CIE2.2; Colors of light signals. Commission Internationale de l'Eclairage.;1975.
- 47) Technical report CIE48;Light signals for road traffic control. Commission Internationale de l'Eclairage.;1980.
- 48) ISO3864-4 Graphical symbols –safety colours and safety signs– Part 4:Colorimetric and photometric properties of safety sign materials. ISO.;2011.

- 49) JIS Z9103 Graphical symbols –safety colours and safety signs– Part 4: Colorimetric and photometric properties of safety sign materials. Japanese Standard Association. ;2018.
- 50) Abramov I, Gordon J, Chan H. Color appearance: Properties of the uniform appearance diagram derived from hue and saturation scaling. *Att Percept Psychophys*;2009;71(3):632-643.
- 51) Rea MS, Freyssinier JP. Color rendering: beyond pride and prejudice. *Color Res. Appl.* 2010; 35(6):401-409.
- 52) Volbrecht VJ, Clark CL, Nerger JL, Randell CE. Chromatic perceptive field sizes measured at 10° eccentricity along the horizontal and vertical meridians. *J. Opt. Soc. Am. A* 2009;26(5):1167-1177.
- 53) Oppner JK, Douda ND, Volbrecht VJ, Nerger JL. Supersaturation in the peripheral retina. *J. Opt. Soc. Am. A* 2014;31(4):A148-A158.
- 54) Mullen KT, Kingdom FAA. Differential distributions of red-green and blue-yellow cone opponency across the visual field. *Visual Neurosci.* 2002;19(1):109-118.
- 55) Mullen KT, Sakurai M, Chu W. Does L/M cone opponency disappear in human periphery? *Perception*, 2005;34(8):951-959.
- 56) Hansen T, Pracejus L, Gegenfurtner KR. Color perception in the intermediate periphery of the visual field. *J Vision*, 2009;9(4) 26:1-12.
- 57) De Valois RL, De Valois KK. A multi-stage color model. *Vision Res* 1993;33(8): 1053-1065
- 58) Brainard DH. (2015). Color and the cone mosaic. *Annu. Rev. Vis. Sci.* 2015:519-546.
- 59) Neitz J, Neitz M. Evolution of the circuitry for conscious color vision in primates. *Eye* 2017;31(2):286-300.

- 60) Patterson SS, Neitz M, Neitz J. Reconciling color vision models with midget ganglion cell receptive fields. *Frontiers in Neuroscience* 13;2019 Article 865:1-12.
- 61) Hofer H, Singer B, Williams DR. Different sensations from cones with the same photopigment. *J Vision*, 2005;5(5):444-454.
- 62) Hofer H, Carroll J, Neitz M, Williams DR. Organization of the human trichromatic cone mosaic. *J Neurosci*. 2005;25(42):9669-9679.
- 63) Brainard DH, Williams DR, Hofer H. Trichromatic reconstruction from the interleaved cone mosaic: Bayesian model and the color appearance of small spots. *J Vision* 2008;8(15):1-23.
- 64) Mogi S, Sakurai M, Ishikawa T, Ayama M. Color appearance of small stimuli presented in central and near peripheral visual fields. *Color Res Appl* 2021;46(4):722-739.
- 65) Heider ER. Universals in color naming and memory. *J Exp Psychol* 1972;93(1):10-20.
- 66) Matsuzawa T. Colour naming and classification in a chimpanzee (pan troglodytes). *J Hum Evol* 1985;14(3):283-291.
- 67) Komatsu H, Ideura I, Kaji S, Yamane S. Color selectivity of neurons in the inferior temporal cortex of the awake macaque monkey. *J of Neurosci* 1992;12(2):406-424.
- 68) Komatsu H. Mechanisms of central color vision. Categorical properties of the color term “GOLD” . *Curr Opin Neurobiol* 1998;8(4):503-508.
- 69) Paggetti G, Menegaz G, Paramei G. Color naming in Italian language. *Color Res Appl* 2015;41(4):402-415.
- 70) Paramei G, Griber YA, Mylonas D. An online color naming experiment in Russian using Munsell color samples. *Color Res Appl* 2017;43(3):358-374.

- 71) Lin H, Luo MR, Macdonald LW, Tarrant AWS. A Cross-cultural colour-naming study: Part I – Using an unconstrained method. *Color Res Appl* 2001; 26(3):40–60.
- 72) Lin H, Luo MR, Macdonald LW, Tarrant AWS. A Cross-cultural colour-naming study: Part II – Using a constrained method. *Color Res Appl* 2001; 26(3):193–208.
- 73) Curcio CA, Sloan KR, Kalina RE, Hendrickson AE. Human photoreceptor topography. *J Comp Neurol* 1990; 292(4):497–523.
- 74) Putnam NM, Hofer HJ, Doble N, Chen L, Carroll J, Williams DR. The locus of fixation and the foveal cone mosaic. *J Vision* 2005; 5:632–639.
- 75) Curcio CA, Allen KA. Topography of ganglion cells in human retina. *J Comp Neurol* 1990;300(1):5–25.
- 76) Yamauchi Y, Yatsu K, Kuchenbecker J, Neitz M, Neitz J. L:M cone ratio of Japanese derived with ERG flicker photometry method. *Invest Ophthalmol Visual Sci* 2013;54(15).
- 77) Stockman A, Sharpe LT. The spectral sensitivities of the middle – and long wavelength – sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. 2000;40(13):1711–1737.
- 78) Technical report CIE170-1; Fundamental chromaticity diagram with physiological axes part 1; 2006.
- 79) Yaguchi H, Lou J, Kato M, Mizokami Y. Computerized simulation of color appearance for anomalous trichromats using the multispectral image. *J Opt Soc Am A* 2018;35(4):B278–B286.
- 80) Hofer H, Singer B, Williams DR. Different sensations from cones with the same photopigment. *J Vision* 2005;5(5):444–454.
- 81) Sabesan R, Schmidt BP, Tuten WS, Roorda A. The elementary representation of spatial and color vision in the human retina. *Sci Adv* 2016;2(9):1–7.

- 82) Legge GE, Pelli DG, Rubin GS, Schleske MM. Psychophysics of reading--I. normal vision. *Vision Res.* 1985;25(2):239-252.
- 83) Legge GE, Rubin GS. Psychophysics of reading. IV. Wavelength effects in normal and low vision. *J Opt Soc Am A.* 1986;3(1):40-51.
- 84) 舟川 政美: 文字の可読性に関する実験的研究. 照明学会誌. 2000;84(11) 785-792.
- 85) 舟川 政美: 色コントラストと可読性に関する実験研究. 照明学会誌. 2000;84(11):799-808.
- 86) 小西 裕也, 原 直也: 有彩色文書の読みやすさに対する明視要素としての等価輝度対比の特性. 照明学会誌. 2008;92(11):787-793.
- 87) Ayama M, Ujike H, Iwai W, Funakawa M, Okajima K. Effects of contrast and character size upon legibility of Japanese text stimuli presented on visual display terminal. *Optical Rev.* 2007;14(1):48-56.
- 88) 舟川 政美, 小田 浩一: ローパス・フィルタリング法による形状の視認性評価. 照明学会誌. 1997;81(5):438-445.
- 89) 岩井 彌, 岡嶋 克典: 正対比文字で構成された文章に対する読みやすさ評価関数. 照明学会誌. 2004;88(11):874-881.
- 90) 原 直也, 野口 太郎: 無彩色背景有彩色文書の文字の明度, 彩度, 色相が読みやすさと透過輝度対比に及ぼす影響. 照明学会誌. 2004;88(11):866-873.
- 91) 岡林 繁, 古川 政光, 畑田 豊彦: 自動車用ヘッドアップディスプレイにおける前景情報と表示情報の認識について. 照明学会誌. 1991;75(6):267-274.
- 92) “ヘッドアップディスプレイの技術評価に関する研究調査委員会報告書. 照明学会”. 2005;JIER-084.
- 93) 阿山 みよし, 藤田 雄大, 鈴木 潤, 川口 嘉史, 小嶋 伸一, 佐藤 孝: ナイトビジョンシステムの視認性評価とそのヘッドアップディスプレイ表示の検討. 照明学会. 2007;91(5):51-257.
- 94) 舟川 政美: 可読性に影響を与える空間要因に関する実験研究. 照明学会誌. 2000;84(11):793-798.
- 95) 舘野 舜介, 茂木 修一, 石川 智治, 佐藤 美恵, 阿山 みよし: 周辺視野における高視認性情報表示に関する研究, 電子情報通信学会 HIP 研究会. 2020:10-14.
- 96) Vergilino-Perez D, Fayel A, Lemoine C, Patrice Senot, Vergne J, Doré-Mazars K: Are There Any Left-Right Asymmetries in Saccade Parameters? Examination of Latency, Gain, and Peak Velocity. *IOVS.* 2012;53(7):3340-3348.

- 97) Foulsham T, Teszka R, Kingstone A: Saccade control in natural images is shaped by the information visible at fixation: evidence from asymmetric gaze-contingent windows. *Atten Percept Psychophys.* 2011;73:226-283.
- 98) Dickson CA, Intraub H: Spatial asymmetries in viewing and remembering scenes: Consequences of an attentional bias?. *Attention, Perception, & Psychophysics.* 2009;71(6):1251-1262.
- 99) 内藤 智之, 苧阪 直行: 上下視野間での注意の非対称性. *生理心理学と精神生理学* 2002;20(3):215-224.
- 100) Foulsham T, Gray A, Nasiopoulos E, Kingstone A: Leftward biases in picture scanning and line bisection: A gaze-contingent window study. *Vision Res.* 2013;78(15):14-25.
- 101) Ossandón JP, Onat S, König P: Spatial biases in viewing behavior. *J Vision.* 2014;14(2):1-26.

謝辞

本研究を進めるにあたり、熱意あるご指導及び人生相談含めて長い間ご指導ご鞭撻頂きました宇都宮大学の阿山みよし名誉教授および石川智治准教授、静岡理工科大学の櫻井将人准教授に深く感謝致します。

特に阿山みよし名誉教授には大学院入学に際して多大なご助言及び、ご協力を頂いただけでなく、入学後も研究を進めるにあたり、研究で何度も大きな壁にぶち当たり挫折を強く感じ何度も心が折れそうに感じることもありましたが、その都度卓越したリーダーシップで研究を成果に導いてくださる姿を後ろから拝見することが出来たことは非常に光栄であるだけでなく、今後仕事をするうえでも非常に貴重な経験をさせて頂きました。また、学業と仕事を両立していく上で、多大なご心配をかけつつ、さらに陰ながらご協力を惜しみなくかけ続けてくれたことは感謝してもしきれず、また今後生きていく上で大きな糧となると思います。このことに関しましては心から感謝の意を表します。

また、共同研究者として多大なご協力を頂きました宇都宮大学の亀井理史さん、館野舜介さんには長い間実験やデータ整理にご協力ご指導頂きありがとうございます。また、阿山石川研究室の皆様には研究するに際して様々なご助言およびご協力を頂きました。心より感謝いたします。

そして、副指導教員の長谷川光司教授、山本裕紹教授、佐藤美恵教授、長谷川まどか教授、大津金光教授には本論文を作成するにあたりお忙しい中にも関わらず、有益なご助言を頂き厚くお礼を申し上げます。

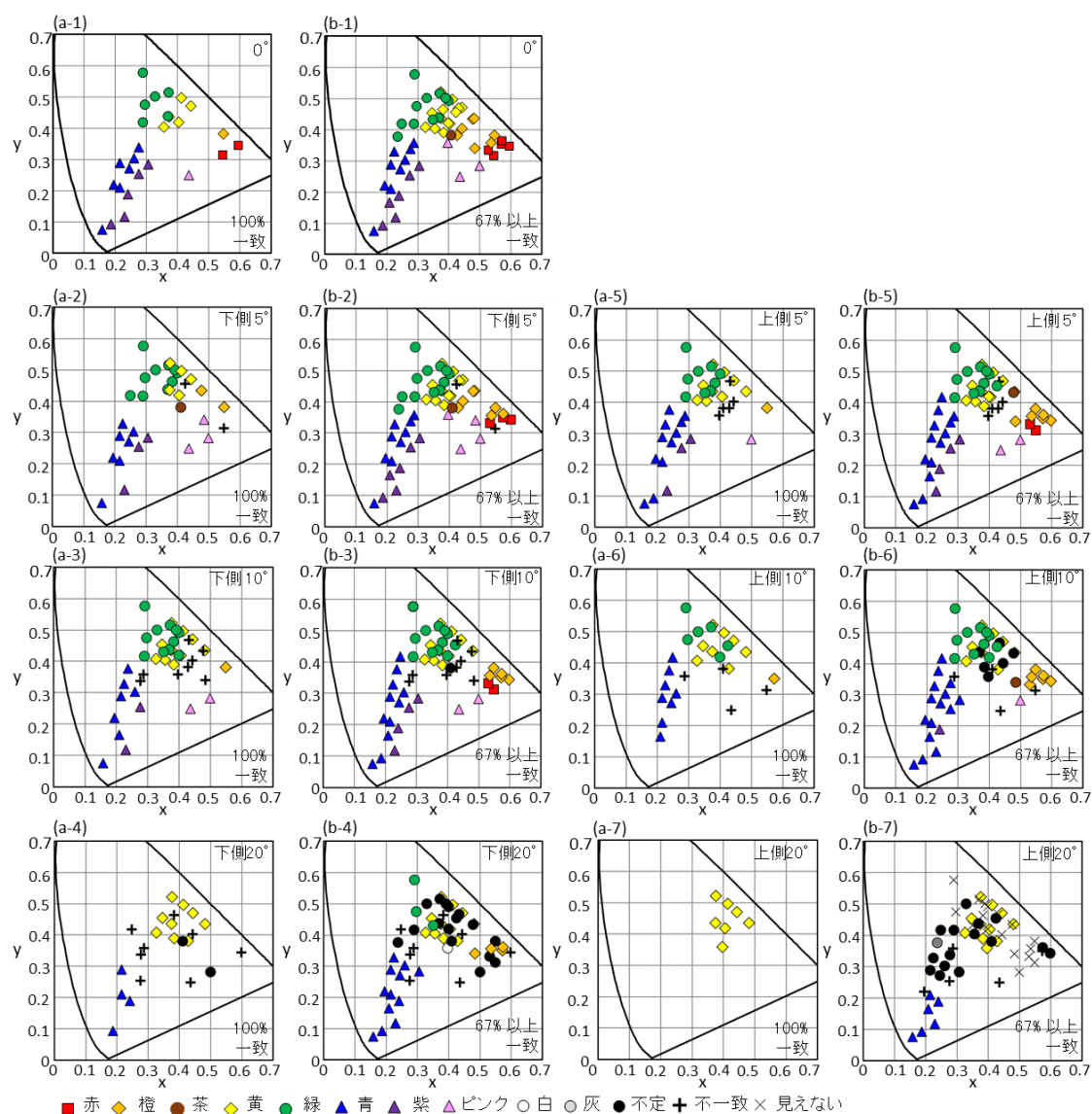
また、キヤノン株式会社、光学技術統括開発センター所長加藤学様、光学技術 32 開発室長難波則廣様には宇都宮大学の入学に際して大変お世話になりました。入学前は体調がなかなか安定せず、ご心配をおかけすることを前提の入学となっていました。入学後はご迷惑をおかけしないようにということで自分の中では可能な限り安定勤務を心掛けて行動することが出来ました。結果として、安定して学業と仕事の両立することが出来るようになっていったのだと思っています。また無事本研究を進めることが出来たのは、入学後も仕事と学業の両立に際し、陰ながらご適切なご助言とご協力を頂いたからであり、今後もこれを機に日々精進していきたいと思っています。誠にありがとうございました。心から感謝の意を表します。

最後に、茂木由香様、純葉様、紗葉には学業と仕事を両立していくにあたり、多大な負荷とご心配をお掛けしたことと思います。いつも温かい目で見守って頂き今日を迎えることができました。ありがとうございます。

付録

図 3-2A. 垂直、水平方向での被験者 AK、KF、KH の様々な刺激の色相彩度の判定の結果（図 3-2 の詳細な内容が記載）図 3-2A に記載された縦棒は、各被験者の 5 回繰り返しの最大標準誤差を示している。図 3-2A (a) ～ (t) は 3 人の被験者の視野の垂直方向及び水平方向で R1、DaY1、B1、G1、BrY1、の色相と知覚的飽和度の測定結果を図示している。また図に示されている負と正の符号は、垂直方向はそれぞれ視野の下側と上側方向、水平方向はそれぞれ視野の鼻側と耳側方向に対応している。

図 3-4A. AK、KF、KH で 100%および 67%以上の一致性を持つカテゴリカル色応答 (CCR) の結果を示している。(図 3-4 詳細版) (a) は 3 人の被験者が同じ応答をした際の結果を示す (100%一致)。(b) は少なくとも 2 人の被験者が同じ応答をした際の結果を示し、(67%以上一致) 図の上側に記載されている文字は中心からの偏位と方向を示す。(中心からの偏位は 0° 、 5° 、 10° 、方向は上側方向、下側方向、鼻側方向、耳側方向)



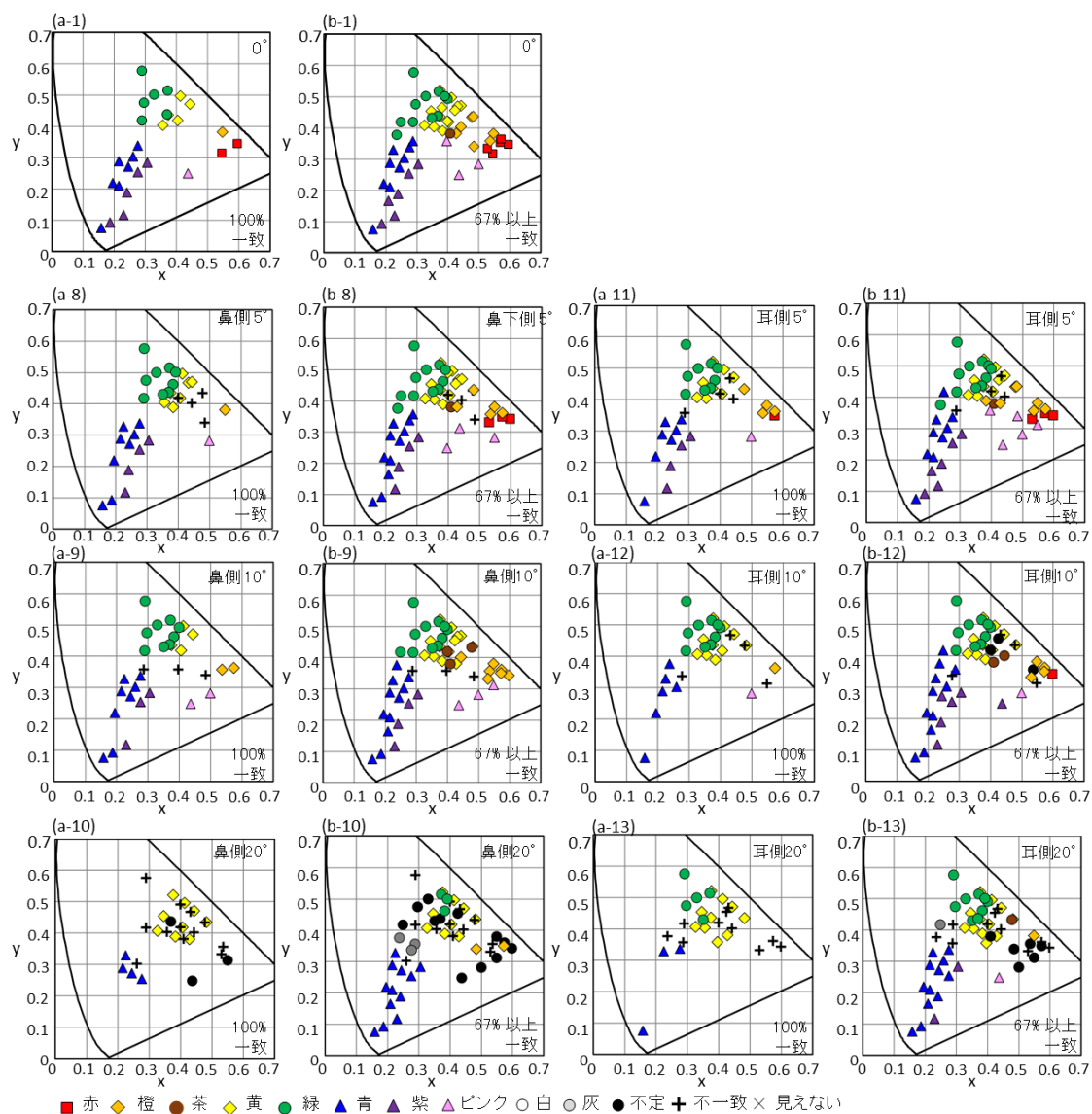
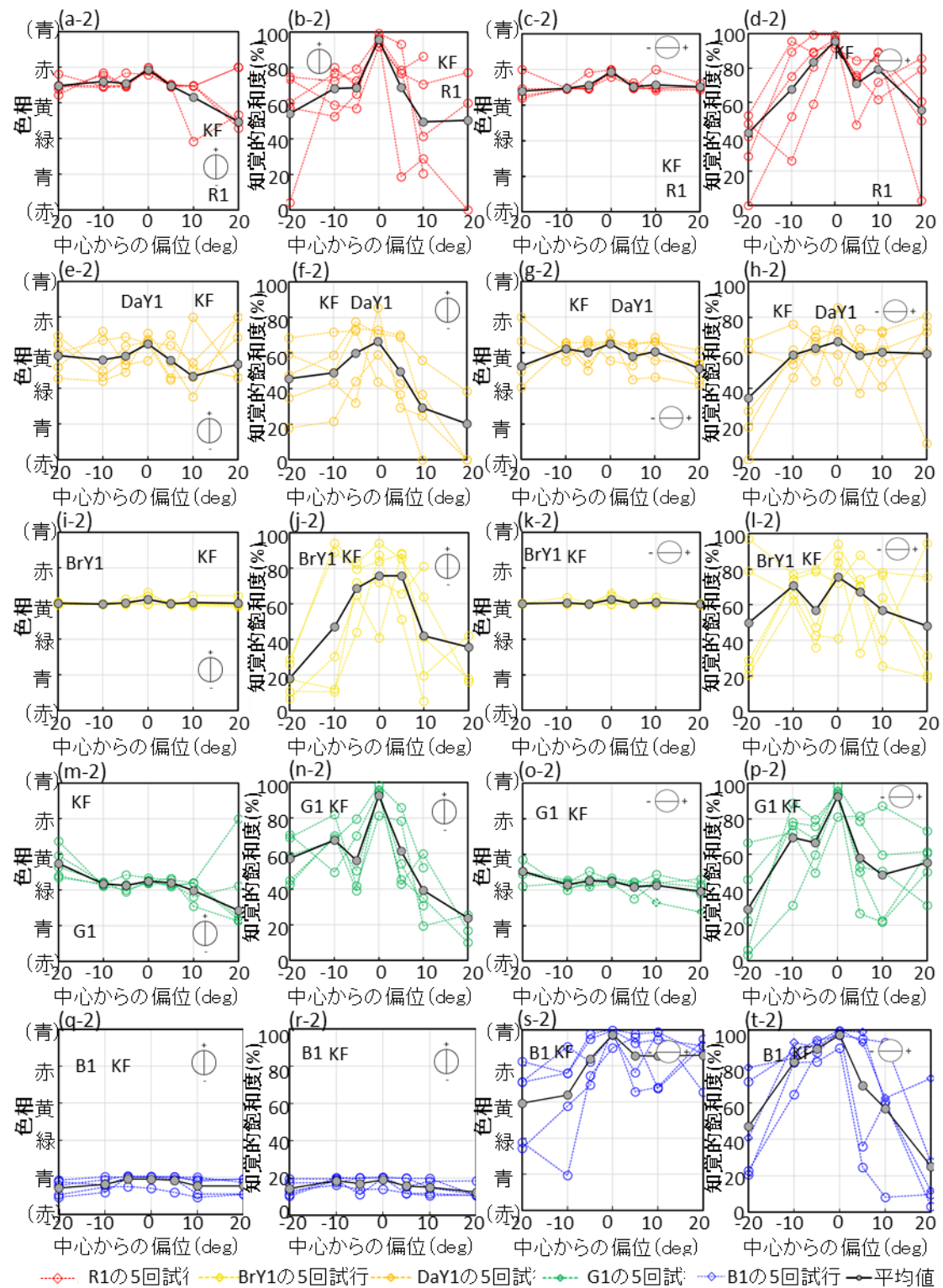


図 5-2A. 第 2 章の結果での被験者の 1 人である被験者 KF、KH の垂直方向の刺激。R1、DaY1、BrY1、G1、B1 の色相と知覚的飽和度の測定結果図 5-2A((a_2) ~ (t_2)、(a_3) ~ (t_3))。ここで横軸は視野の中心からの偏位（視野位置）を度(°)で表している。この中心からの偏位（視野位置）の負と正の値は、垂直方向は、それぞれ視野の下側方向と視野の上側方向の角度に対応している。水平方向はそれぞれ視野の鼻側方向と視野の耳側方向の角度に対応している。図 5-2A 内(a) (c) (e) (g) (i) (k) (m) (o) (q) (s)の縦軸は、図 5-1A の左下に示す色相環の垂直方向に細長い円周を示している。図 5-2A 内(b) (d) (f) (h) (j) (l) (n) (p) (r) (t)の縦軸は、知覚的飽和度の値を示す。点線で結ばれた空白の菱形は 5 回の試行の結果を示し、実線で結ばれた塗りつぶされた菱形はそれらの平均値を示している。



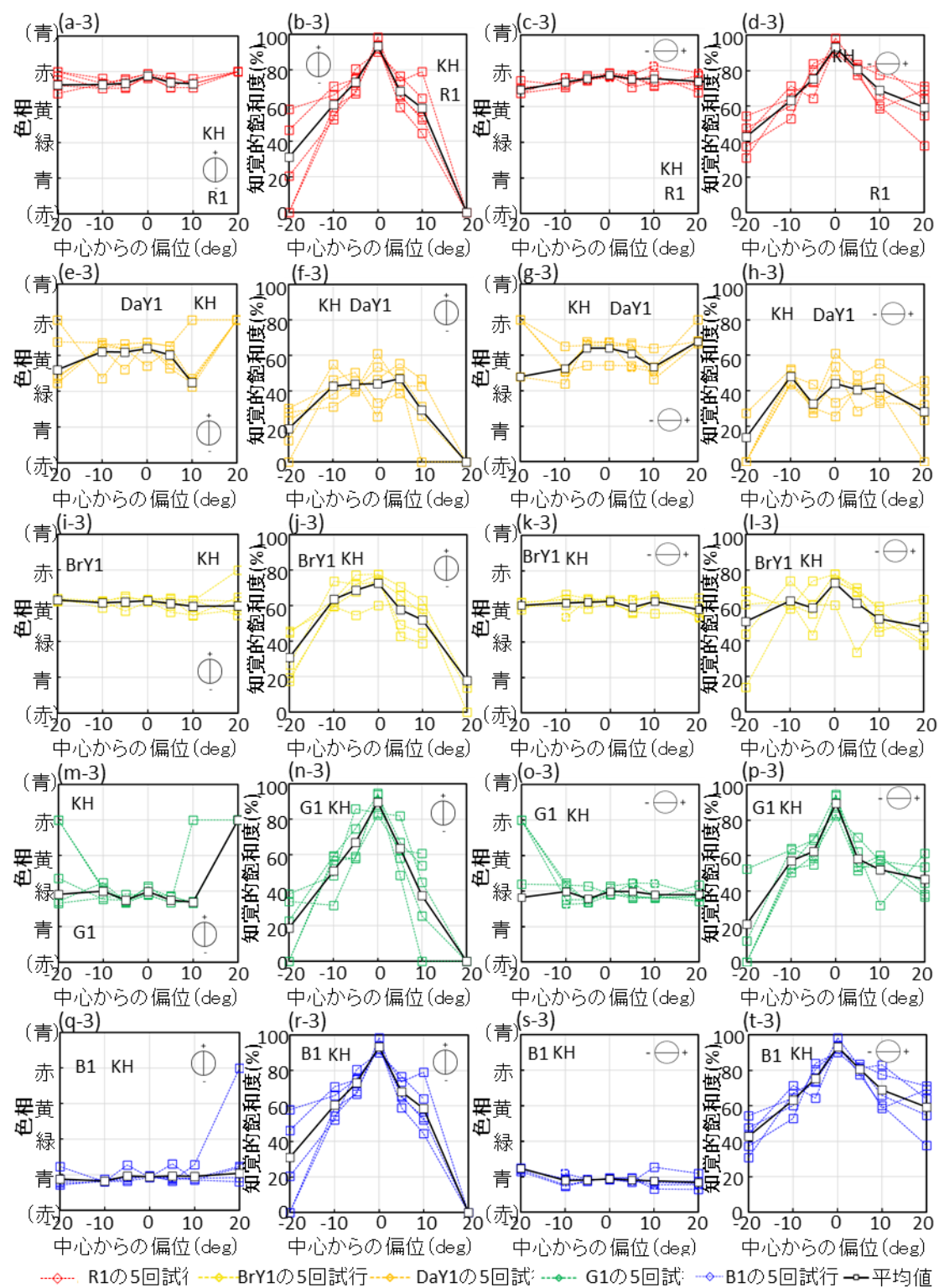
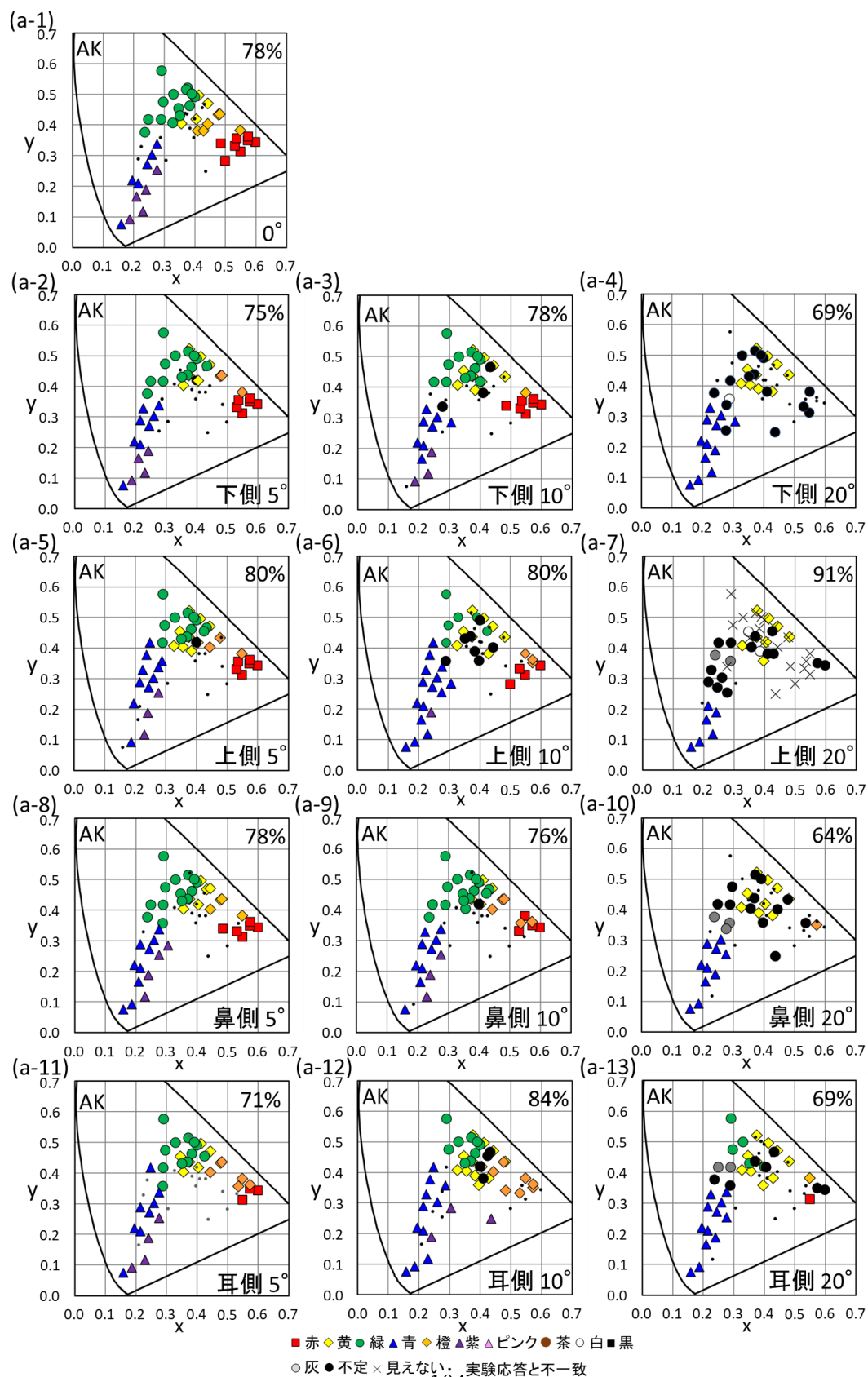
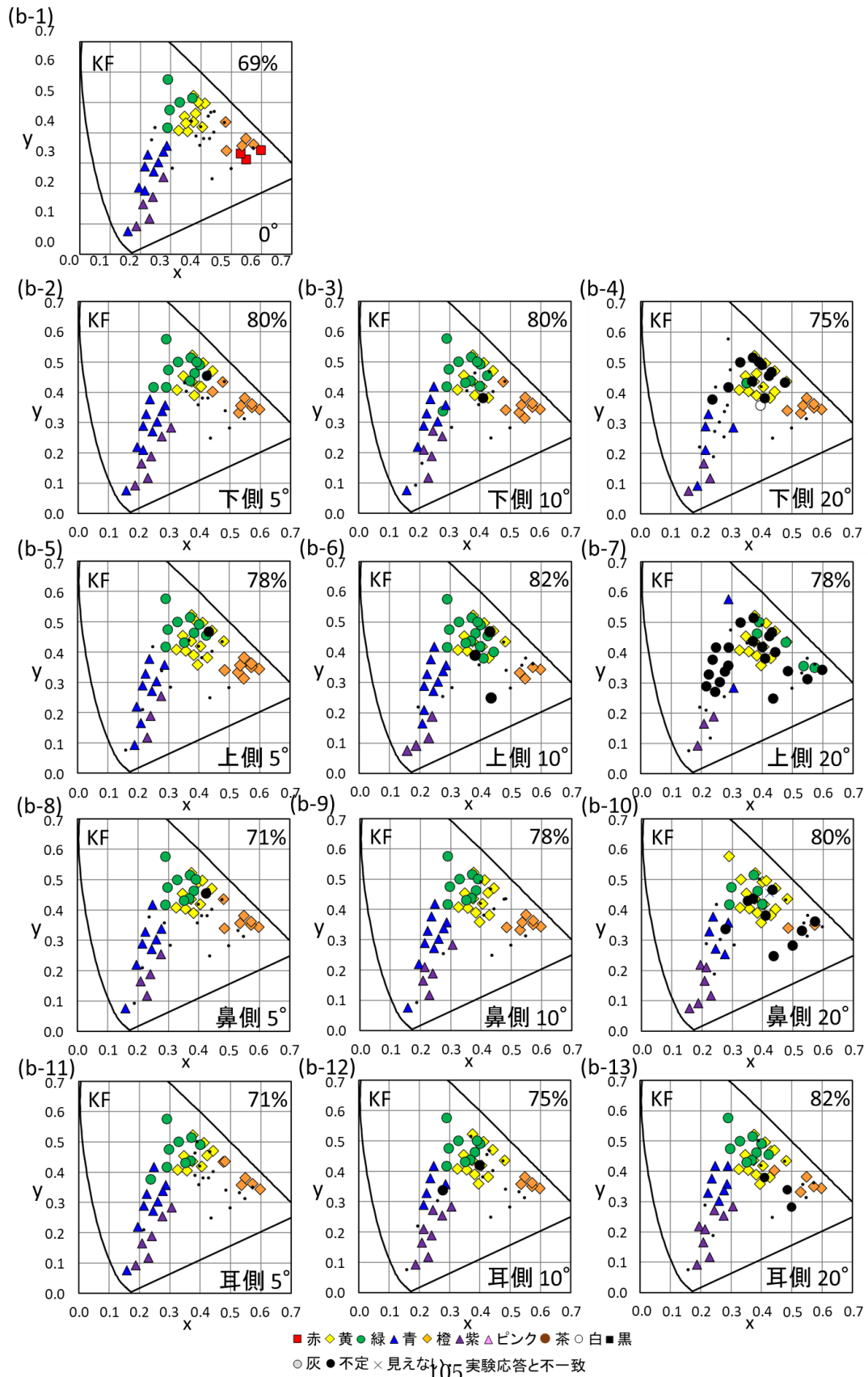


図 5-4A. AK、KF、KH3 人の被験者で、視野の上側方向、下側方向、鼻側方向、耳側方向に 0 度と 5 度、10 度、20 度でのカテゴリカルカラーネーミングの推定結果。色度図にプロットされた色の記号と黒い円は、それぞれ正しく推定された色彩カテゴリカル色応答 (CCR) と不定の結果を示している。小さな点は、推定されたカテゴリカル色応答 (CCR) が実験応答と一致しなかった刺激を示している。右上隅の数字は、見えない応答以外の応答に対する正答率を示している。





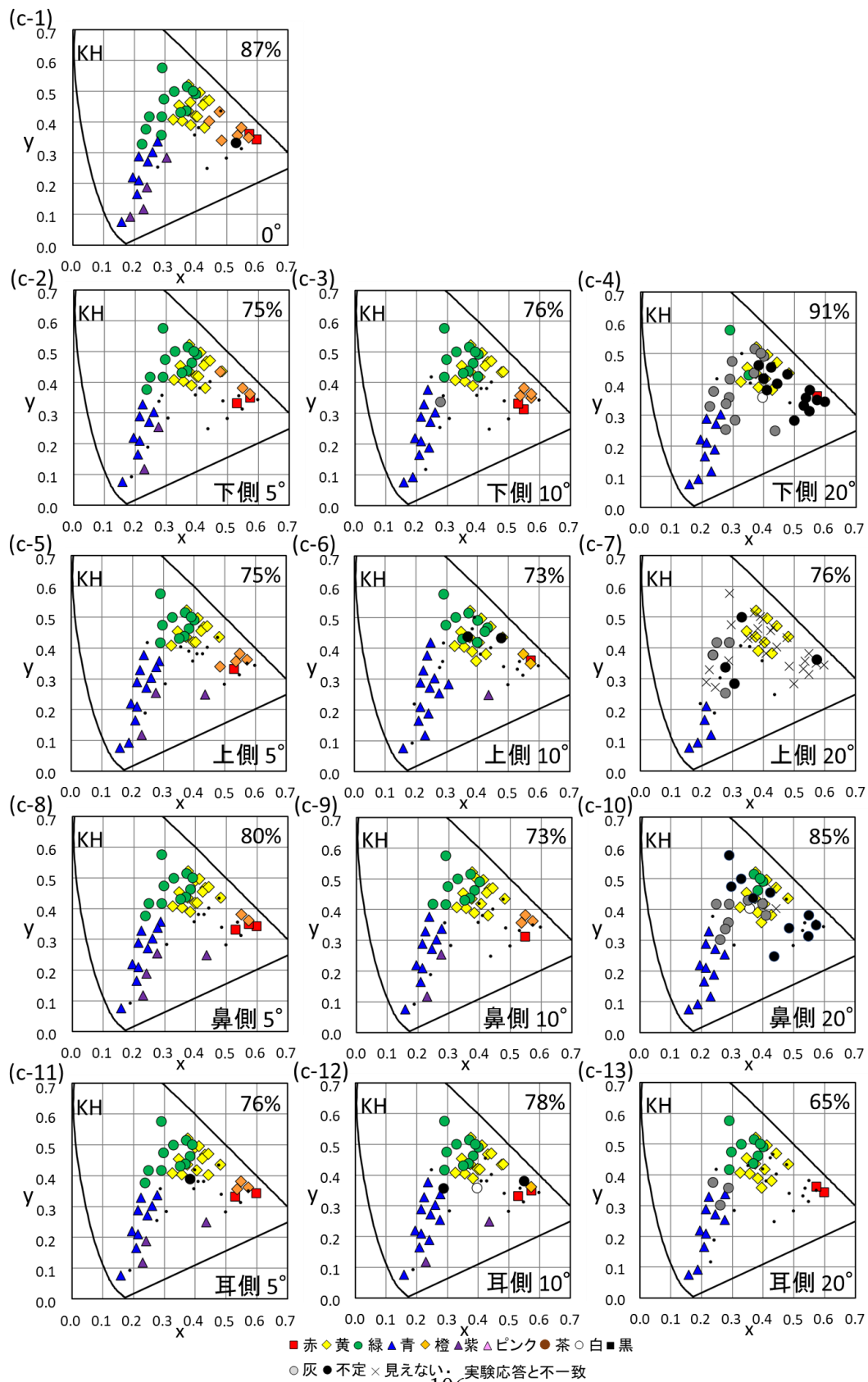
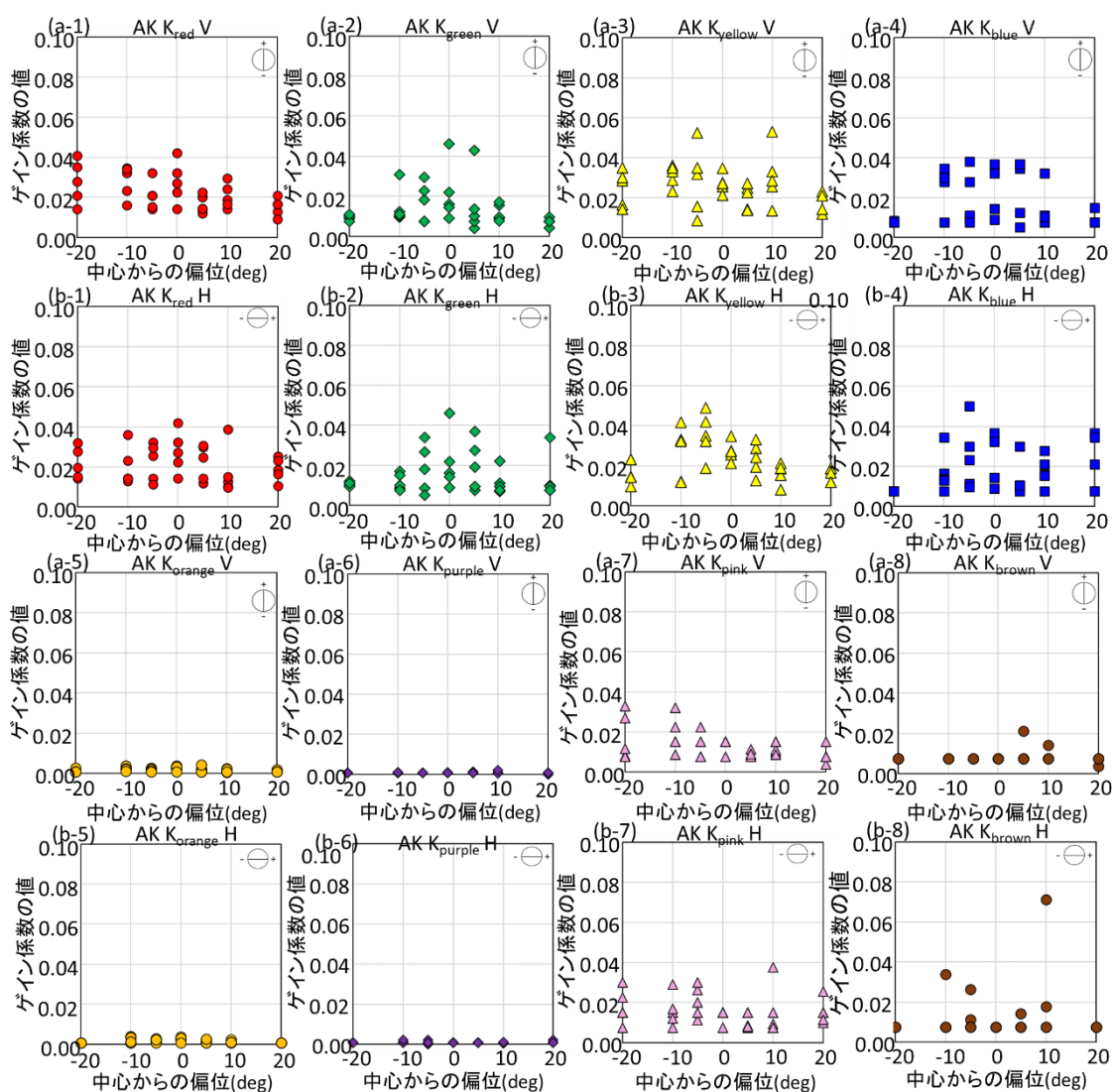
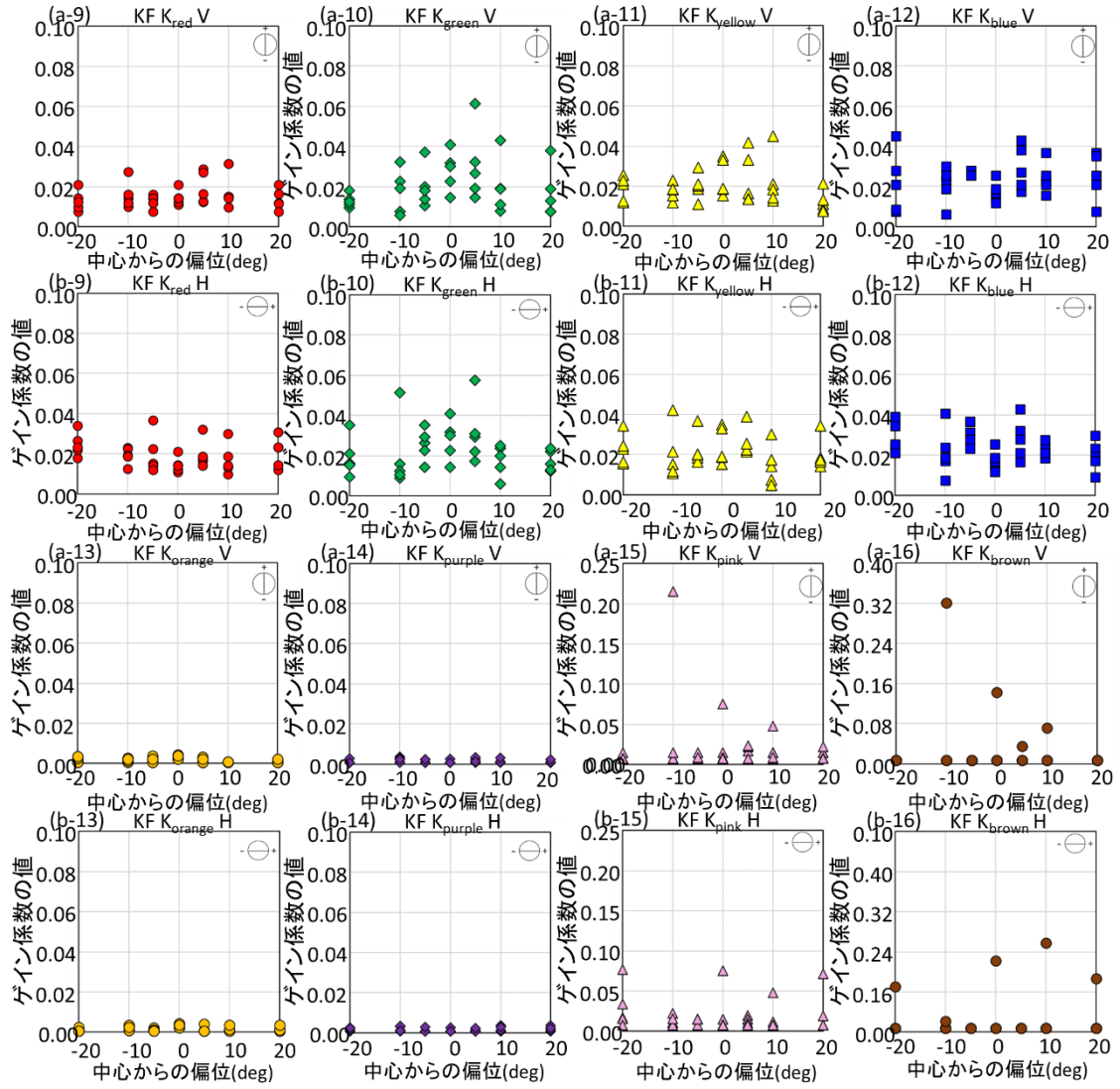


図 5-5A. 図 5-5A は、AK、KF、KH3 名分のゲイン係数の位置による変化のグラフを示す。(a-**)は垂直方向、(b-**)は水平方向を示す。また、ハイフンの後に続く数値の意味は 2~8 は被験者 AK、9~16 は被験者 KF、17~24 は被験者 KH を示す。また図内の負正符号は、垂直方向はそれぞれ視野の下側、上側方向、水平方向は視野の鼻側、耳側方向に対応している。 K_{red} 、 K_{green} 、 K_{yellow} 、 K_{blue} 、 K_{orange} 、 K_{purple} 、 K_{pink} 、 K_{brown} はそれぞれ赤、緑、黄、青、橙、紫、ピンク、茶の係数の分布を示す。





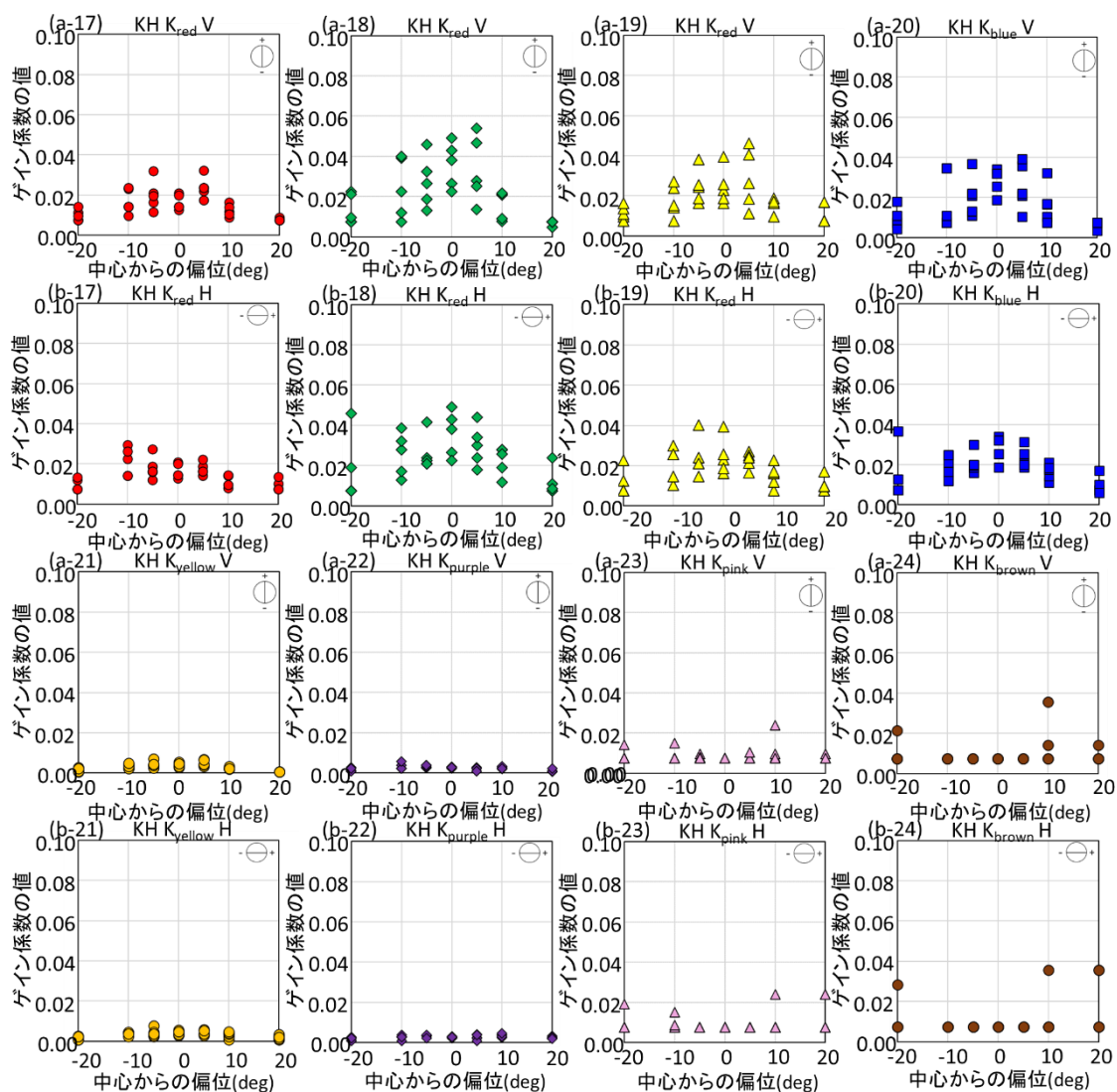


図 5-6A. 3 名の閾値 θ の位置による変動のグラフを示す。(a-1) (b-1) (c-1) (d-1) は AK、(a-2) (b-2) (c-2) (d-2) は KF、(a-3) (b-3) (c-3) (d-3) は KH の結果を示す。(a) は統一 gain (0~10deg 平均) での最適 th (c) は (a) の平均値を示す。(b) は試行別の最適 gain での最適 th (d) は (b) の平均値を示す。(c) は 0~10deg で平均した際の最適化した試行別の最適 gain での最適閾値 θ (th) の平均値を示す。(d) は試行別の最適 gain での最適閾値の平均値を示す。また図に示されている負と正の符号は、垂直方向はそれぞれ視野の下側と上側方向に対応しており、水平方向はそれぞれ視野の鼻側と耳側方向に対応している。

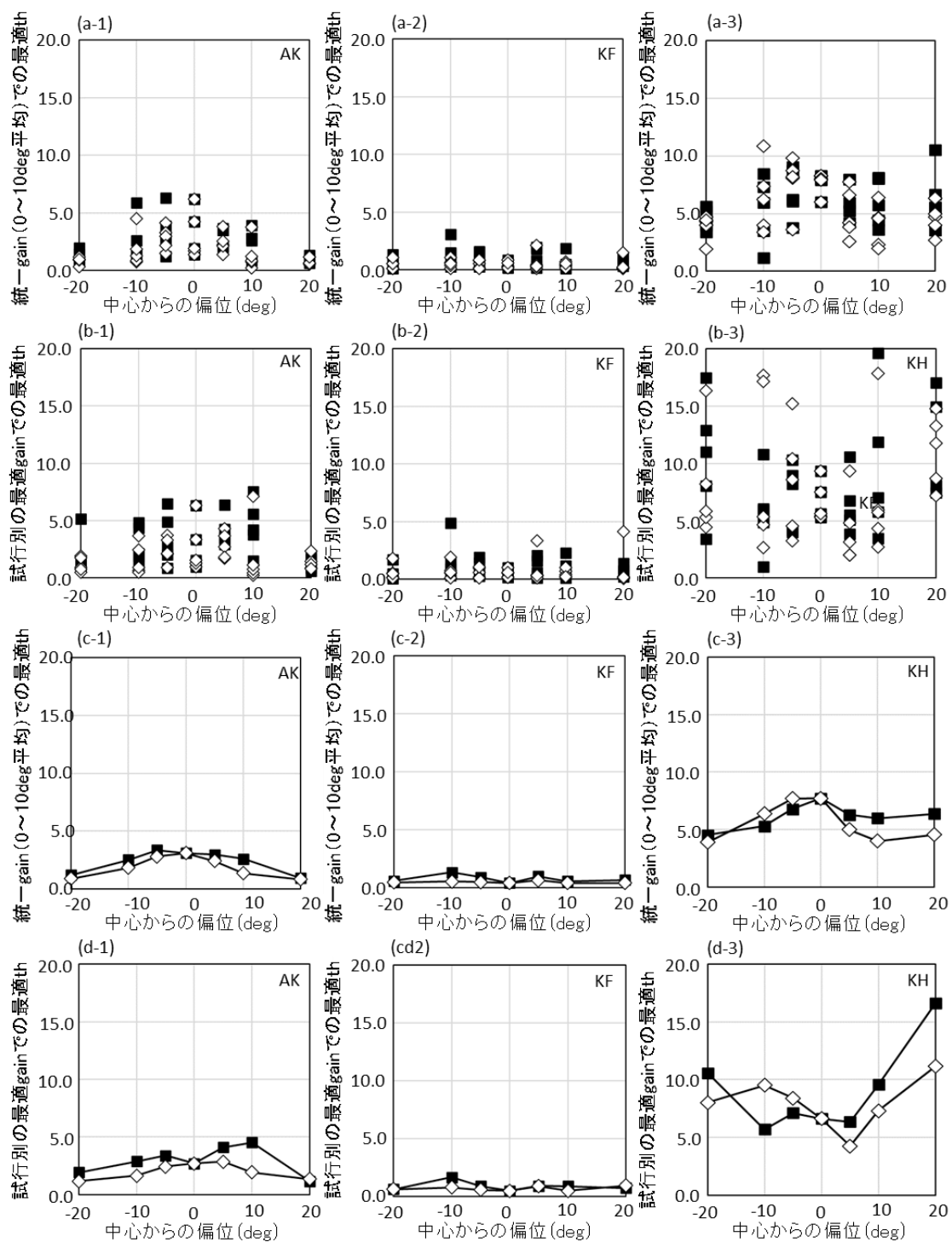


表 5-3. カテゴリカル色応答 (CCR) が色毎でのゲイン係数の制約条件

Equation	No.	Equation	No.
$K_{red} < \frac{ red }{ yellow } \cdot K_{yellow}$	(a01)	$K_{orange} < yellow \cdot K_{red}$	(a14)
$K_{red} < \frac{ red }{ blue } \cdot K_{blue}$	(a02)	$K_{orange} < red \cdot K_{yellow}$	(a15)
$K_{red} < \frac{1}{ blue } \cdot K_{purple}$	(a03)	$K_{orange} < \frac{1}{ black } \cdot K_{brown}$	(a16)
$K_{red} < \frac{1}{ yellow \cdot black } \cdot K_{brown}$	(a04)	$K_{orange} < \frac{ yellow }{ white } \cdot K_{pink}$	(a17)
$K_{red} < \frac{1}{ white } \cdot K_{pink}$	(a05)	$K_{brown} < yellow \cdot black \cdot K_{red}$	(a18)
$K_{green} < \frac{ green }{ yellow } \cdot K_{yellow}$	(a06)	$K_{brown} < red \cdot black \cdot K_{yellow}$	(a19)
$K_{yellow} < \frac{ yellow }{ red } \cdot K_{red}$	(a07)	$K_{brown} < red \cdot yellow \cdot K_{black}$	(a20)
$K_{yellow} < \frac{ yellow }{ green } \cdot K_{green}$	(a08)	$K_{brown} < black \cdot K_{orange}$	(a21)
$K_{yellow} < \frac{1}{ red } \cdot K_{orange}$	(a09)	$K_{brown} < \frac{ yellow \cdot black }{ white } \cdot K_{pink}$	(a22)
$K_{green} < \frac{ green }{ yellow } \cdot K_{yellow}$	(a10)	$K_{pink} < white \cdot K_{red}$	(a23)
$K_{green} < \frac{ green }{ blue } \cdot K_{blue}$	(a11)	$K_{pink} < white \cdot yellow \cdot K_{orange}$	(a24)
$K_{blue} < \frac{ blue }{ red } \cdot K_{red}$	(a12)	$K_{pink} < white \cdot blue \cdot K_{purple}$	(a25)
$K_{blue} < \frac{ blue }{ green } \cdot K_{green}$	(a13)	$K_{pink} < red \cdot K_{white}$	(a26)