

博士論文

多様な色覚における 色知覚および色名認識空間に関する研究

Study on internal space of color perception and color name cognition
in various color vision

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

大古場 稔

主任指導教員:

2018. 4~2020. 3 阿山みよし教授

2020. 4~2022. 3 石川智治准教授

概要

大多数の人間の網膜には分光感度特性の異なる三種の光受容細胞 L, M, S 錐体があり, これが色覚最末端の基盤メカニズムである. 全人口の男性の約 5%, 女性で 0.25% が, 先天性の色弱者(Color deficient observer, 本研究では略して CDO と呼ぶ)である. L, M, S 錐体のうち L 錐体の機能が欠損し一般色覚者(Color normal observer, 本研究では略して CNO と呼ぶ)と異なる Protan と, M 錐体の機能が欠損し一般色覚と異なる Deutan の 2 つの型の CDO は, 赤から緑までの色弁別能が CNO に比べて低いが, 一方でその色知覚特性には弱度から強度まで大きな個人差があることも知られている. 以前より複数の色の刺激に対する差の近さを答える実験から心理的な知覚的色空間を調べる研究が行われてきた. しかし, CDO の知覚的色空間の個人差についての研究は多いとは言い難い. また, 先行研究において, CDO の色名による脳内色空間は CNO の人と同じであるという報告がある. さらに, 赤緑色覚異常である Protan, Deutan は, 中・長波長領域に感度を有する錐体 2 種を持っていたとしても, それらの分光感度のピーク波長が近接していて分光感度の波長の差が小さいことから, 赤と緑を見分けるのが困難であると考えられているが, 一般生活において, 容易に CNO が赤いと言う物を赤, 緑と言う物を緑と, 色のネーミングが正確に行えるという先行研究がある.

これらを踏まえ, 本研究では, CNO, Protan, Deutan の, 個人とグループの知覚的色空間と, 色名による脳内色空間の多様性を定量的に明らかにすることと, ネーミングにおける各色空間の関連性を明らかにすることを目的とした.

まず, 高彩度と中彩度の知覚的相違度判定実験と, 色名の相違度判定実験をおこなった. 被験者数は CNO, Protan, Deutan 各々 10 名(中彩度相違度判定実験は各 9 名, 7 名, 9 名)である. 知覚的相違度判定実験では, テスト刺激は Munsell 基本 10 色相の色票群より作成した 2 色 1 対の色票カード 45 対, 左右反転を併せて合計 90 対, 高彩度群と中彩度群をそれぞれ作成した. 色名の場合は Munsell 基本 10 色の名前をのうち 2 色毎の色名を 45 組, 左右反転併せ 90 対の色名を紙に記載した. 相違度判定の評価語は“とても近い”から“とても遠い”の 5 段階より選択する方式とした. 評価による相違度判定の結果に多次元尺度構成法(MDS)を行ったところ, 知覚的色空間の結果, CNO は全員 Munsell 色相環に近い円形になった. CDO の多くは Y と PB で屈曲し R と G が近くなる C-shape となったが, 形状にばらつきがあり, また Protan と Deutan で 1 名ずつ CNO と同様の円形となった. 色名実験においては, CNO, Protan, Deutan 全グループにおいて, 円形となった. 個人の特性を定量的に解析するために,

歪量を表す Distortion Index(DI と略す)を導入し、定量解析をおこない、知覚的色相環において、CNO に対して Protan, Deutan において広い分布があることを示すことができた。また色名空間においては CNO も CDO も分布が小さいことが分かった。

さらにピーク波長シフトを考慮した L, M, S 錐体分光感度から輝度, r/g, y/b 空間を構築してそこでの色差を算出し、さらに知覚的相違度判定における飽和的特性を導入したモデルを提案した。このモデルにより、CNO の知覚的色空間である円形と、CDO 特有の C-Shape について、個人特性に対応したパラメータとのフィッティングにより形状を、従来のモデルより高い相関で示すことができるようになった。こうして、このモデルを用いて個人の知覚的色空間と、色名による色空間について定量的に特徴を示すことができた。

次に、知覚的色空間と色名による脳内色空間の、2 つの関係を調べるために、両方の脳内色空間を利用すると想定されるカラーネーミング実験をおこなった。知覚的相違度判定実験で用いた Munsell 基本色相の高彩度群と中彩度群の各色票 10 色に対して、自由にネーミングする実験と、Basic Color Term (BCT と略す) 11 色から選択する実験をおこなった。この結果より、BCT の実験から高彩度において正解率の高い色名の回答結果を得た。しかし中彩度では、被験者間、被験者内のばらつきが大きくなった。定量的に解析するため、ネーミング結果の差に対し、色名実験により得られた相違度をあてはめることでマトリクスを得て、MDS を行うことで、ネーミングにおける脳内色空間を推定した。これらの DI を比較すると、CDO では、値の大きい順(すなわち円より歪んでいる度合いが大きい順)に、知覚的色空間の DI, ネーミングの脳内色空間の DI, 色名による色空間の DI の順となった。ネーミングの際の脳内色空間は知覚的色空間よりも歪が減少した広い空間となっている。これらより、CDO は、カラーネーミングする際は、色名空間を学習した時に得た、色知覚以上の情報を利用して、カラーネーミングを行っていることが示唆される。

内容

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	視覚と色覚	2
1.2.1	色覚に関する眼の構造	2
1.3	一般色覚と色覚異常	3
1.4	色覚の分類	5
1.5	本研究の目的	6
1.6	本論文の構成	6
第2章	色知覚、色名による個人の脳内色空間	7
2.1	はじめに	7
2.2	先行研究	7
2.3	本章の目的	9
2.4	色知覚, 相違度評価実験	10
2.4.1	実験概要	10
2.4.2	実験刺激	10
2.4.3	実験環境	12
2.4.4	実験手順	13
2.4.5	被験者	14
2.4.6	実験結果	15
2.4.7	Distortion Index による解析	17
2.5	色名, 相違度評価実験	23
2.5.1	実験概要	23
2.5.2	実験刺激	23
2.5.3	実験環境	24
2.5.4	実験手順	24
2.5.5	被験者	25
2.5.6	色名実験結果	25
2.5.7	Distortion Index による比較解析	26
2.6	第2章のまとめ	26

第3章	色空間推定モデル	27
3.1	はじめに	27
3.2	個人の色空間推定モデル	28
3.2.1	シミュレーションの流れの説明	28
3.2.2	錐体分光感度	29
3.2.3	Luminance, r/g, and y/b 空間内のカラーチップの距離	32
3.2.4	Ach, C(r/g), C(y/b) 空間での距離から相違度評価への変換	35
3.3	個人の色空間の Fitting 解析	37
3.4	第3章のまとめ	41
第4章	CNOとCDOのカラーネーミング	42
4.1	はじめに	42
4.2	カラーネーミング実験	43
4.2.1	実験概要	43
4.2.2	実験刺激	43
4.2.3	実験環境	44
4.2.4	実験手順	44
4.2.5	被験者	44
4.3	実験結果	45
4.4	解析	48
4.4.1	色名追加実験	48
4.4.2	カラーネーミング実験解析手順	52
4.4.3	解析結果と考察	54
4.6	第4章のまとめ	59
第5章	まとめ	60
5.1	まとめ	60
5.2	今後の展望	60
謝辞	62	
付録 A	66	

図目次

図 1-1: 眼球の構造と網膜と錐体の位置関係	2
図 1-2: S,M,L 錐体分光感度.....	3
図 1-3: Protan Deutan の錐体分光感度	4
図 2-1: 高彩度のカラーカードの例(a) と, テーブル上の実験の際のカードの例(b)	11
図 2-2: 色知覚実験環境の図.....	12
図 2-3: 色知覚実験 実験手順	13
図 2-4: D15 テスト用チップ	14
図 2-5: アノマロスコープ	14
図 2-6: 高彩度, 中彩度色票実験より得られた 全被験者の知覚的色空間.....	16
図 2-7: Normal, Protan, Deutan の 2 人の代表的な個人 MDS 結果と、平均の MDS 結果	19
図 2-8: 色知覚実験の全 DI 高彩度(左)、中彩度(右)	20
図 2-9: 色名実験環境	24
図 2-10: 色名実験のフローチャート	24
図 2-11: 色名による色空間.....	25
図 2-12: 試験別、色覚型別の全 DI.....	26
図 3-1: シミュレーションの工程フロー	29
図 3-2: Lumi, r/g, y/b チャンネルの分光応答関数(左), と 10 カラーチップの布置(右) 34	
図 3-3: 飽和曲線と、飽和曲線を用いて得られたシミュレーション値からの MDS 結果	36
図 4-1: カラーネーミング実験のカラーカード.....	43
図 4-2: フリーネーミング実験結果.....	45
図 4-3: 制限 BCT 実験の結果	46
図 4-4: 10 色色名実験と、追加 15 色色名実験との比較.....	50
図 4-5: 10 色色名実験と、15 色色名実験の DI 値の比較.....	51
図 4-6: カラーネーミングの際の解析手順の説明図.....	52
図 4-7: 高彩度色票に対するカラーネーミング	54
図 4-8: 中彩度色票に対するカラーネーミングの色空間.....	55
図 4-9: 色知覚, カラーネーミング, 色名の各実験の色空間の個人の DI.....	57
図 4-10: カラーネーミングの高彩度と中彩度 DI の比較	57
図 4-11: カラーネーミングの平均グラフと DI	58

表目次

表 1-1:色覚型の分類.....	5
表 2-1:ラベルとカラーチップの Munsell 値.....	11
表 2-2:DI の個人の値	17
表 2-3:色知覚実験の DI に対する混合 ANOVA.....	21
表 2-4:色知覚実験高彩度の多重比較検定	22
表 2-5:色知覚実験高彩度の多重比較検定	22
表 2-6:Munsell 色相環の基本 10 色の日本語表記と英語表記.....	23
表 3-1: 個人高彩度色知覚色空間の差異を示すパラメータ群	39
表 3-2:相関係数 R に対する Repeated Measure Anova.....	40
表 3-3:相関係数 R に対する Post Hoc Comparisons	40
表 4-1:カラーネーミング実験の被験者	44
表 4-2:被験者と実施試験との関係.....	49
表 4-3:カラーネーミング試験の色空間の DI.....	56

第1章 序論

1. 1 はじめに

自然科学において個人の特性に対する関心が高まっている。DNA 解析や、ゲノム解析による個人の特徴の原因探索が進んでいる。同時に、社会では個人の特性が画一的でないこと、つまり個人の多様性を理解し、認め、共存する社会へ移りつつある。

人間の代表的な感覚である視覚についても、多様性への理解が進んでいる。視覚の内、色の見え方に関して、一般色覚と色弱という大きな分類がなされてきた[1, 2]。

日常生活において、色名は物の属性を表す形容詞として「赤い花」、「青い鳥」などと用いられることが多い。しかし、厳密にいうと色は心理物理量であり、物の属性ではない。物体の属性であるのは、物体の分光反射特性である。外光などの照明光が物体に当たり、物体からの反射光のうち可視光領域 380nm から 780nm の分光スペクトルの光の強度を目がとらえ、各個人の色覚メカニズムで処理され各々の脳内で色知覚を形成する。色の見えに関する個人の多様性は、目に入ってくる光を、情報として脳まで伝達するまでの過程、すなわち色覚メカニズムにおける個人差により生じる。長波長領域で反射率の高い花卉を持つ花を自然光下で観察する時、自分は赤い花と知覚したとしても、隣で見ている人が同じように赤く見えているとは言えない。しかし大多数の人にとっては、熟したバナナは黄色く、コカ・コーラの缶は赤く見える。秋の山々では緑から橙、そして赤に変化する紅葉を楽しんでいる。このように多数の人における色覚メカニズムの共通性から、脳内での色知覚に対する感性的な価値は多くの人で似通っていて、同じ感情を共有する。それと同時に、一部には先天的に赤から橙、黄、そして緑へ色の変化の検出が難しい人がいる。先天性赤緑色覚異常の人であり、その存在比率の多さは、日本人男性の約 5%、女性の 0.25%と決して少なくない。またその人々の視覚特性に関しても分光感度の程度の個人差があることが明らかになってきている。この理由については遺伝子研究などからも明らかになってきており、多くの研究が進められている。しかし、色の認識は、視物質の分光感度だけで決まるものではなく、脳内で形成されるものである。人は色を利用するとき、相対的な色刺激の差でその単色の特徴を感じて、その色を示す物質や現象と紐づける。さらにその色刺激に名前を付け言語で他人と情報を共有している。したがって、赤と緑の色弁別が難しい色覚異常の人々の色の見え方の個人差、各分類に属する人の個人差の分布を明らかにして、個人がどのように色刺激をとらえ、色の名前を利用しているかを脳内色空間での定量化により解析し、関係を理解することは重要であると考えられる。

1. 2 視覚と色覚

1. 2. 1 色覚に関する眼の構造

本研究では色覚を中心に扱うため、最初に目の構造から説明する。図1に眼球の構造と網膜と錐体の位置関係について示す。人の目に入った光は、水晶体を通り網膜にある光受容細胞である錐体と桿体へたどり着く。そこで、各錐体の分光感度に基づき、神経を伝達する信号へ置き換わる。置き換わった信号は、網膜神経節細胞(Retinal Ganglion Cell)へ送られ脳へ伝わり、そこで整理され感覚となる。光受容細胞としては今世紀初頭に内因性光感受性網膜神経節細胞(ipRGC)が発見され、環境光レベルの検知、眩しさ、色知覚、そして睡眠制御に関係していることが明らかにされてきた。しかし先天性色覚異常との関係は未解明なので、ここでは詳細には立ち入らない。

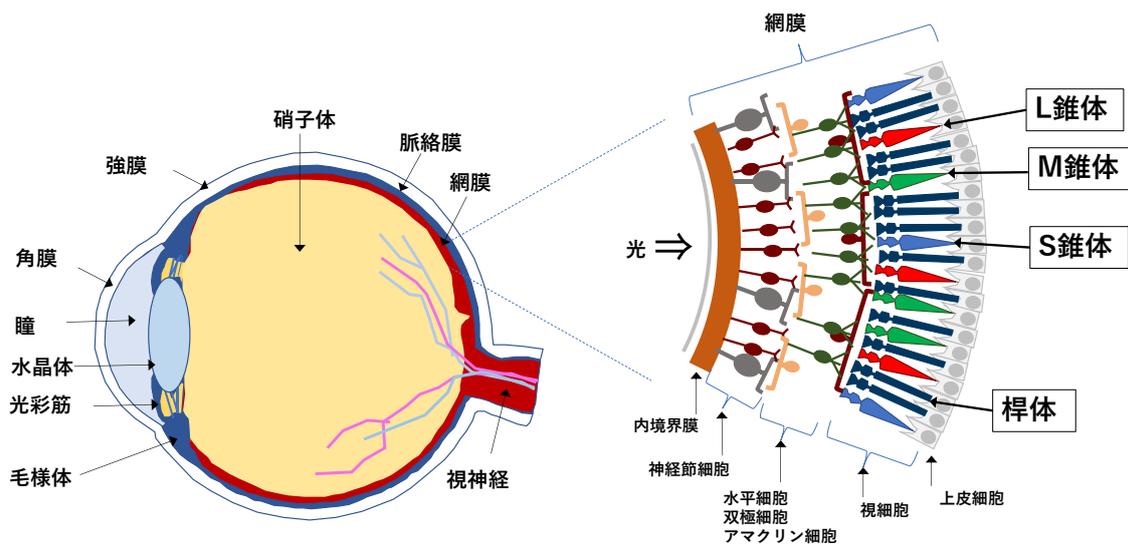


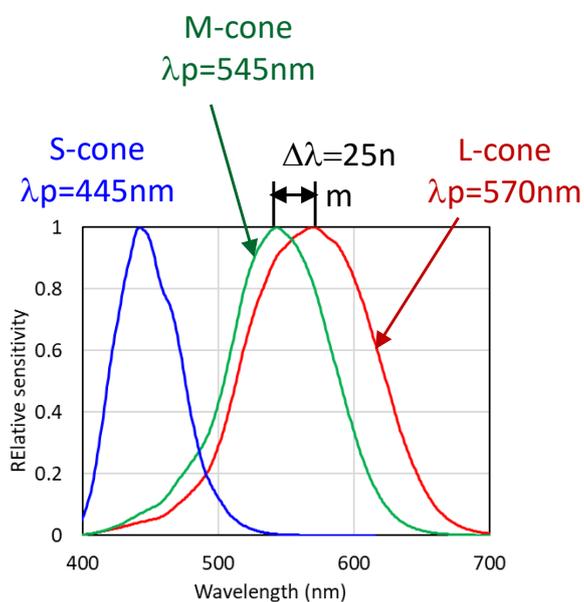
図 1-1: 眼球の構造と網膜と錐体の位置関係

ここではまずその入り口となる錐体の分類と機能について説明する。また、従来の色覚の型の分類は、それぞれの錐体の状態を推定することに基づき分類されてきた。そのような経緯も踏まえて、錐体を中心に色覚型の分類について説明する。

1.3 一般色覚と色覚異常

S, M, L 錐体はそれぞれ短波長, 中波長, 長波長の領域に感度を持つ, 網膜内にある光受容体であり, これらの応答により一般色覚の人の色の見え方の基礎的な信号は形成される.

一般色覚 Color Normal Observe(CNO)の錐体分光感度は図 1-2 に示すように, 後述の赤緑色弱者と異なり, L 錐体と M 錐体の分光感度のピーク波長は各々570nm および545nm 付近であり, ピーク波長が約 25nm 異なる. この特徴を利用して色弱者は赤と緑の色弁別を行う.



出展 CIE170-1:2006

図 1-2: S, M, L 錐体分光感度

先天性赤緑色弱者 Congenital red-green color deficient observer とは，M または L 錐体の欠損(2 色覚)，または M または L 錐体の変質(異常 3 色覚)がある人を指す．この欠損または変質により，550~570nm 付近に分光感度のピーク波長がある 2 種の錐体のピーク波長の差 $\Delta\lambda$ が，一般色覚(CNO)の約 25nm より小さいまたは 0 となる．図 1-3 にそれぞれの CDO のスペクトルを示す．図中上段が Protan，下段が Deutan である．左が 3 色覚で，右が 2 色覚である．550nm 付近の波長の差が小さいことが読み取れる．

CDO は，このピークの差が小さい，または，ないことにより，赤と緑を CNO ほど顕著にみわけることが困難となっている．

これ以降，本研究では，上記の先天性赤緑色弱者を CDO，一般色覚者を CNO と呼ぶ．

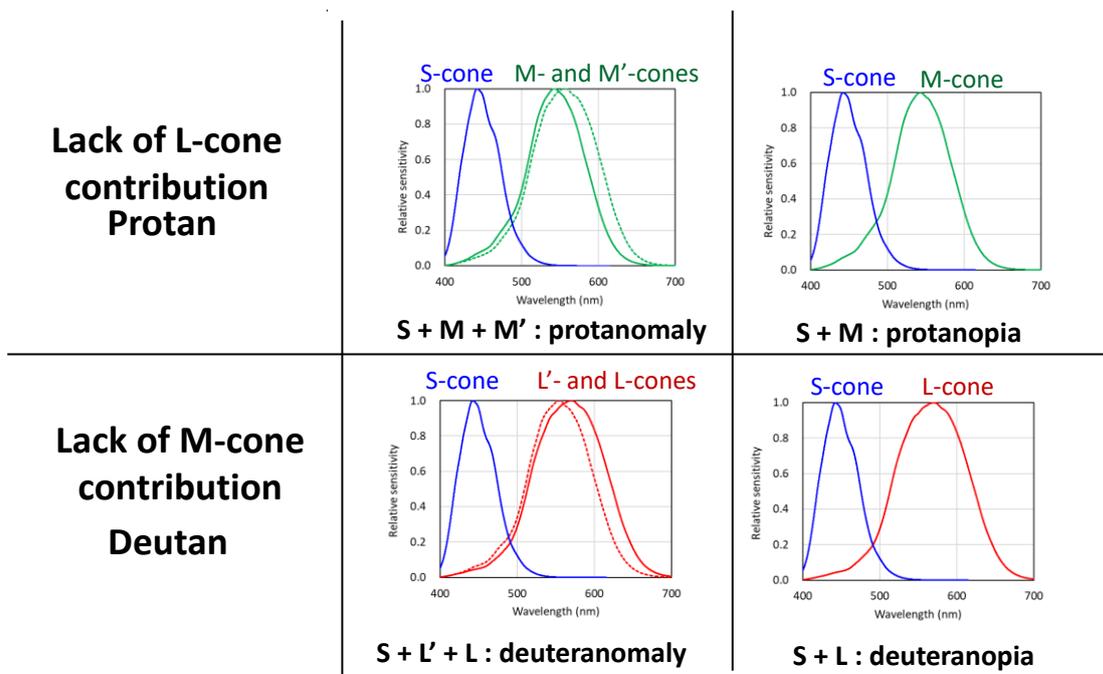


図 1-3: Protan Deutan の錐体分光感度

1. 4 色覚の分類

他のタイプを含む全体の分類は、CIE240[3]、と日本医学会の分類[4]に従い表 1-1 のように分類できる。本研究においては、色覚異常の中で、特に比率が高い Protan と Deutan の方々の色覚を調査の対象とした。色覚異常のなかで構成比率が少ない、例えば S 錐体の機能の特性が異なる Tritan や、1つの種類の錐体のみが機能している Cone monochromacy や、すべての錐体が機能してはず、桿体のみのある Rod monochromacy は本研究では対象としなかった。対象とする CDO に着目すると、2色覚は L 錐体の機能が欠損した Protanopia と、M 錐体の機能が欠損した Deuteranopia に分類される。同様に異常3色覚は(anomalous trichromats)は M 錐体と、M の類似錐体を持つ(Lは持たない) Protanomalous と、L 錐体と L の類似錐体を持つ(Mは持たない) Deuteranomalous に分類される。それらの錐体は、中波長から長波長に対して感度を持つ[5, 6]。Deuteranomaly は、色覚異常の程度に幅がある三色性異常の中で最も多いタイプで、2つの L 錐体色素のスペクトル分離と関連があると考えられている[7]。本研究では、Protan は、それぞれ Protanopic と Protanomalous observers を指し、Deutan は Deuteranopic と Deuteranomalous observers の事を指す。

表 1-1:色覚型の分類

CNOorCDO	機能する錐体の種類の数		Type name	機能する錐体			特徴のある錐体 に応じた分類	
				L	M	S		
(CNO) 正常色覚 colour-deficient observer (CDO)	trichromacy	normal trichromacy	normal trichromacy	○	○	○		
		anomalous trichromacy	Protanomaly 1型3色覚	Protanomaly 1型3色覚	△ M'	○	○	Protan 1型色覚 L錐体が異なる Deutan 2型色覚 M錐体が異なる Tritan 3型色覚 S錐体が異なる
			Deuteranomaly 2型3色覚	Deuteranomaly 2型3色覚	○	△ L'	○	
	Tritanomaly 3型3色覚		Tritanomaly 3型3色覚	○	○	△		
	dichromacy	Protanopia 1型2色覚	Protanopia 1型2色覚	×	○	○		
		Deuteranopia 2型2色覚	Deuteranopia 2型2色覚	○	×	○		
		Tritanopia 3型2色覚	Tritanopia 3型2色覚	○	○	×		
	monochromacy 色盲	cone monochromacy			×	×	○	
					×	○	×	
					○	×	×	
		rod monochromacy	rod monochromacy	×	×	×	(*)	

特徴がある錐体だけに色付け

英字記載: cie240_2020に準拠、日本語記載: 日本医学会2007年に準拠

1.5 本研究の目的

前述のように、様々な色覚特性に対して、錐体の特徴に応じた分類はあるものの、その色知覚特性には弱度から強度まで大きな個人差があることも知られている。以前より多数の色刺激群から2色の色刺激対を選び、その知覚的な近さを答える実験から心理的な知覚の色空間を調べる研究が行われてきた[8]。しかし、CDOの知覚の色空間の個人差についての研究は多いとは言い難い。また、先行研究において、CDOの色名による脳内色空間はCNOの人と同じであるという報告がある[8]。さらに、赤緑色覚異常であるProtan, Deutanは、中・長波長領域に感度を有する錐体が1つ、または2つあるものの、それらの分光感度のピーク波長が近接していて分光感度の分離が少ないことから、CDOは赤と緑を見分けるのが困難であると思われるが、一般生活において、CDOは容易にCNOが赤いという物を赤、緑という物を緑と、色の命名がCNOと同様に行えるという先行研究がある[9]。

これらを踏まえ、本研究では、CNO, Protan, Deutanの、個人とグループの、知覚の色空間と、色名による脳内色空間の多様性を定量的に明らかにすることと、ネーミングにおける各色空間の関連性を明らかにすることを目的とした。

1.6 本論文の構成

第1章で序論として、先天性赤緑色覚異常の説明と、全体の目的について説明する。

第2章で、知覚の色空間、色名色空間を色覚タイプごと、個人ごとに示す。

第3章で、知覚の色空間を表すモデルの提案について説明する。

第4章で、知覚の色空間と、色名による脳内色空間との両方を利用すると考えられるカラーネーミングについて、実験と考察を交えて、色弱者がどのように色空間を利用しているか考察する。

第5章で、全体のまとめを示す。

以上の内容から構成する。

第2章 色知覚、色名による個人の脳内色空間

2.1 はじめに

本章では、初めに色知覚による知覚的脳内色空間について、相違度評価実験をおこない、その個人特性を明らかにしていく。次に色名について同様の検討を行ない、色名色空間について明らかにしていく。本章の実験に先立ち、背景となる先行研究と、そこから導かれる本章の目的を説明する。

2.2 先行研究

CDO は、淡い橙と淡い緑、同じ明度の灰色とマゼンタなど、CNO が識別しやすい色の組み合わせを識別することが困難である。そのため、色覚メカニズムの特性の解明、効果的な色覚テストの開発、ユニバーサルカラーデザインのためのデータベースの提供などを目的として、CDO の色弁別特性を CNO と比較して示した研究が数多く行われている [10-13]。

色弁別特性に関する研究知見が蓄積されているのとは対照的に、CDO と CNO の色表現の違いについて報告している研究は多くはない。それらについて先行研究を、ここで紹介する。ここで記載する「色表現」とは、色相、明度、彩度が、被験者の脳内どのように配置されているかを意味する。

Shepard と Cooper [8]は、異なる視覚システムを持つ人の色表現に関する長期的な研究に基づいた結果を報告している。彼らは、14 人の CNO、11 人の CDO(Protan と Deutan)、1 人の monochromat、6 人の全盲の被験者、そして論文には掲載されていないその他の 5 人の弱い色覚異常者で試験を行っている。まず刺激として、“red”、“orange”、“gold”、“yellow”、“green”、“turquoise”、“blue”、“violet”、“purple”の 9 つの色名を選択している。そして 1)印刷された色名、2)CNO において上記の色名に対応するカラーチップのペア、3)色名付きのカラーチップのペア、の 3 種類のカード群を用意した。また、全盲者のために、色名が点字で書かれたカード群を用意した。それぞれのカードは 36 枚で、9 色または 9 色名から 2 つずつの組み合わせで構成されている。すべてのカードをシャッフルして被験者に提示し、被験者にはカードの類似性の順位に従ってカードを並べ替えるよう指示した。実験結果は様々な方法で分析されたが、本研究に最も近いのは、彼らの研究で図 2 に示された Names Only と Color Only の条件における CNO、CDO、monochromat の MDS の結果である。Names Only の MDS 構成は、CNO と CDO で、Munsell Color System などの色相順では、どちらもほぼ円

形になっている。MDSの構成では、CNOのColors OnlyはNames Onlyと同様に円形を呈している。Colors OnlyのCDOとNames Onlyの全盲の結果はC-shapeになっている。また、CDOの曲げ位置は“yellow”と“turquoise”で非常にはっきりしている。これらは、青・黄・赤・緑の平面とMDSの第一軸と、第二軸の重み空間における個人差の範囲をそれぞれ示されているが、各色覚タイプの被験者間でMDSの構成がどのように、どの程度変化するかは示されていない。

Paramei [14] は、3人のCNO、1人のProtanope、1人のDeuteranopeの被験者を対象に、17色の単色刺激を用いて色名付け実験を行い、被験者の色空間を再構成した。被験者は、与えられた刺激の色知覚を表現するために、“red” “yellow” “green” “blue” “white”の中から最大3つの色名を用いて表現する。使用した色名の数に応じて合計10点を割り当て、回答を5次元のベクトルとしてMDS分析に入力した。結果は、赤-緑、青-黄、無彩色を軸とする3次元空間で表された。CNOの17個の刺激の配列は、波長順に3次元空間の連続した曲線に沿って提示されたのに対し、CDOは波長順ではない第2象限に中波長の刺激が集まっていた。ただし、彼らの研究では、被験者の数はCDOのタイプごとに1人であった。

Parameiら [15] は、5人のCNO、2人のProtans、4人のDeutansを対象に、「色の非類似性」の判断に基づくグループのMDS結果を示した。また、全被験者を対象とした「グループ色空間」を構築し、その軸に沿った圧縮や伸長、1次元と2次元の平面上での回転角度で個体の特性を表現した。個体の特性を表すパラメータは極座標図に緻密にプロットされている。しかし、個々のCNOやCDOのMDSの結果がどのように、どの程度変化するかは示されていない。

Bonnardel [16] は、39人のCNOのデータと5人のDeutansの個別データを、自由仕分け、制約付き仕分け、制約付き名称付け、の3つのタスクに基づいて、20の基本色相と7種の明度を持つ140個のMunsellチップを用いて、色分類マップを表示している。そして、2つのチップの類似性を、すべてのペアについて被験者の間での合意の度合いから算出し、MDS分析を行なっている。色分類のデータを心理的な距離に変換する独自の方法を採用し、2つの異なるチップ間の距離は、各被験者が両方とも同じカテゴリーを選択した場合にはゼロとなり、すべての被験者がそれぞれ異なるカテゴリーを選択した場合には最大として計算した。それらの数値から求まるMDS解析の結果を3次元空間にプロットしている。1次元目と2次元目は、グリーン-[ピンク/パープル]軸と、ブルー-[イエロー/オレンジ]軸に対応し、それぞれG-R、B-Yとラベルを付けた。CNOの3次元目の軸は明るさに関連しているが、CDOの3次元目の軸は何

に対応しているものかは明確には判らなかったと記されている。この Bonnardel の研究 [16]では、5人の Deutan の被験者で 140 個の Munsell チップの個別色分類マップを論文中、図 1 に示しているものの、知覚色空間、すなわち MDS 構成は、各色覚タイプを代表するものとなっている。

Lillo [17] もまた、102 個のカラーチップに対して、15 人の CNO、8 人の Protanope、9 人の Deuteranpoe に対し、11 個の Basic Color Term を用いて、カテゴリーに分類するカラーマッピングと、最も良い例となる色名の選択実験を行なっている。2 つのチップ間の類似性は、Bonnardel[16]の研究と基本的に同様の方法で導き出し、チップのすべてのペアについて confusion matrix を構築し、MDS 分析をおこなった。CNO の色表現は、赤・緑、黄・青、明度の 3 つの軸を持つ 3D モデルでよく表現されており、これまでの結果[15, 16]と一致していた。一方、CDO の色表現は、Protan と Deutans の両方とも、第 1 軸と第 2 軸がそれぞれ青とオレンジの有彩色、白と黒の無彩色と思われる 2D モデルで適切に表現されていることがわかった。本研究では、Bonnardel の研究と同様、各グループの代表的な色知覚空間のみを表示したものとなっている。

2.3 本章の目的

これらの報告で示されたように、色覚タイプの代表的な特性は示されているものの、個人がそれぞれどのような色覚特性を持っているかは明らかにされていない。視覚に基づく色が個人の脳内でどのように配置されているかを知ることは、個人にとって識別しにくい色の組み合わせを把握することや、パーソナルディスプレイの色再現をカスタマイズしたりするなど、さまざまな面で有用である。近年、パーソナル機器の普及に伴い、色表示のカスタマイズが注目されている[18, 19]。個人用の新しい機器の色再現性を最適化するためには、被験者個人の視覚に基づく色表現が不可欠であり、有用なものとなる。

そこで、本章では、CNO と 2 種類の CDO (Protan, Deutan)の視覚に基づく色表現の性質を調べ、個人差と、各分類の範囲を明らかにすることを目的とした。

2.4 色知覚, 相違度評価実験

2.4.1 実験概要

色知覚の相違度評価実験について, 説明と結果を示す. 本研究では, 採用したすべてのペアの知覚的差異が CDO でも閾値を超えていて, 2つのチップが多かれ少なかれ異なって見えることから, この判定を「類似性スケーリング」ではなく「相違度評価」と呼んでいる. これは単なる呼び方の問題であり, その使い方は Shepard and Cooper [8]の「類似性スケーリング」と全く同じものを指す.

2.4.2 実験刺激

刺激は, 高彩度と中彩度の 2 グループ(2 群, 2 デッキなどとも呼ぶ)を用意した. それぞれ, 明度の異なる 5 つの原色と 5 つの副色の Munsell カラーチップで構成した. Munsell 表記は表 2 のとおりである. 高彩度チップは, CNO と盲目の被験者の色空間を比較した奥寺ら[20]が採用した刺激と同じものを選択した. 高彩度の R, YR, Y, G, PB, P は, Sturges and Whitfield [21]が報告した赤, 橙, 黄, 緑, 青, 紫のそれぞれの焦点色に非常に近く, さらにこれらは Berlin and Kay [22]の焦点色にも同様に近い. B は彼らの青の領域の緑の境界線上に位置し, GY は緑の領域の内側だが黄の境界線に近いところにあり, BG は青と緑の領域の間に, RP は紫とピンクの領域の間にある. 中彩度のチップは, 高彩度のグループと同じ色相から選ばれたが, Munsell 彩度は 3 または 4 とした (表 2-1). 高彩度グループと中彩度グループのそれぞれについて, 10 色相のすべての組み合わせ(${}_{10}C_2=45$ 組)のカラーカードを用意した. カラーカードはそれぞれカラーチップ 2 色が配置されていて, カラーエリアの大きさは 25mm×35mm で, チップ間は 25mm 離れて配置されている. カラーカードのカラーエリアの周辺部は無彩色で, N8 のグレースケールに近い見え方をしていた. 図 2-1 は, 高彩度チップのカラーカード 5 例と, 実験でテーブルの上に置いたカードを示している.

表 2-1:ラベルとカラーチップの Munsell 値.

Label	High chroma	Medium chroma
R	5R 4/14	5R 4/4
YR	5YR 6.5/14	5YR 6.5/4
Y	5Y 8/14	5Y 8/4
GY	5GY 6.5/10	5GY 6.5/4
G	5G 4.5/10	5G 4.5/4
BG	5BG 4/9	5BG 4/3
B	5B 4/8	5B 4/3
PB	5PB 4/12	5PB 4/4
P	5P 4/11	5P 4/3
RP	5RP 4/12	5RP 4/4

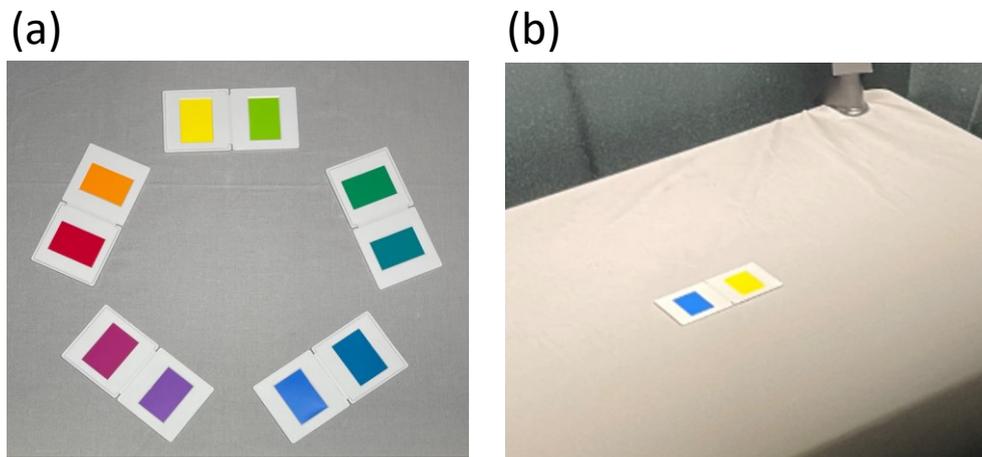


図 2-1:高彩度のカラーカードの例(a) と, テーブル上の実験の際のカードの例(b)

2. 4. 3 実験環境

暗室に置いた、幅 75cm、奥行き 50cm の机にグレーの布(N6. 5に近い)を敷きその机の上で実験をおこなった。机の中央付近にカラーカードを置き、図 2-2 のように蛍光灯 (CCT:5000K)で照明した。カラーカードの水平方向の照度は 560lx であった。観察時の視距離は約 50cm であった。

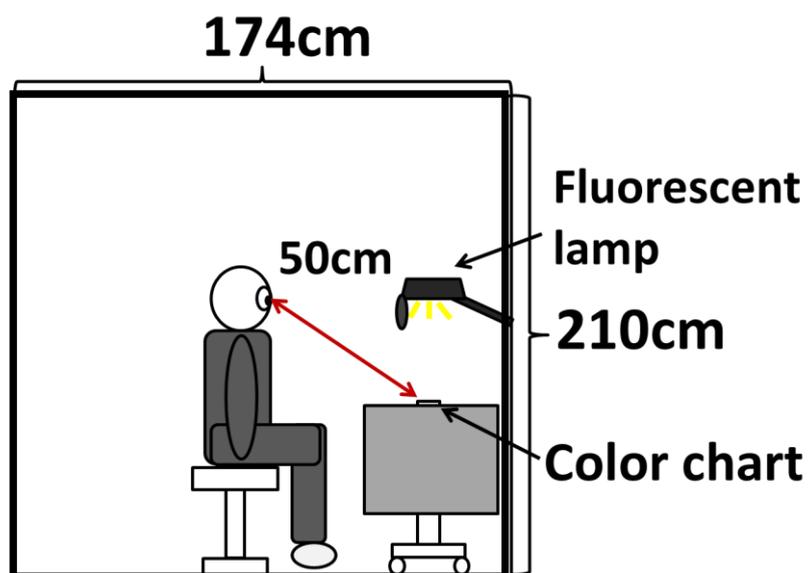


図 2-2: 色知覚実験環境の図

2. 4. 4 実験手順

色知覚実験の実験手順について説明する。実験開始時、まず暗室の外で実験者から研究の目的や実験内容の説明をおこなった。また、宇都宮大学の研究倫理規定に基づいて作成されたインフォームド・コンセント用紙に同意いただき、各被験者に署名を行っていただいた。その後、各被験者に暗室に入ってもらった。実験は図 2-3 の手順でおこなった。被験者が視覚環境の光に順応してから 10 分後に開始した。実験者は、被験者の目の前の机の上にカラーカードを置き、カラーカード上の 2 つの色の間の知覚的距離を、1(非常に近い)、2(やや近い)、3(どちらともいえない)、4(やや遠い)、5(非常に遠い)の尺度で評価するように求めた。被験者は事前に渡された解答用紙に評価点を書き込むよう指示された。被験者が答えを書いた後、実験者はカラーカードを取り上げ、次のカラーカードを提示した。前半は 45 枚のカラーカードがランダムな順序で提示され、その後、5 分から 10 分の休息時間を設けた。その後、同じ組の 45 枚の色カードを、左右を反転させた別のランダムな順序で提示した。実験者は観察ブースの隣の黒いカーテンで仕切られた小さなスペースにおいて、色カードを出すときのみブースに手だけ入れるようにした。高彩度のカラーカードの試験、中彩度のカラーカードの試験のどちらも同様の手順で行い、セッション間には少なくとも 1 時間の休憩を空けた。

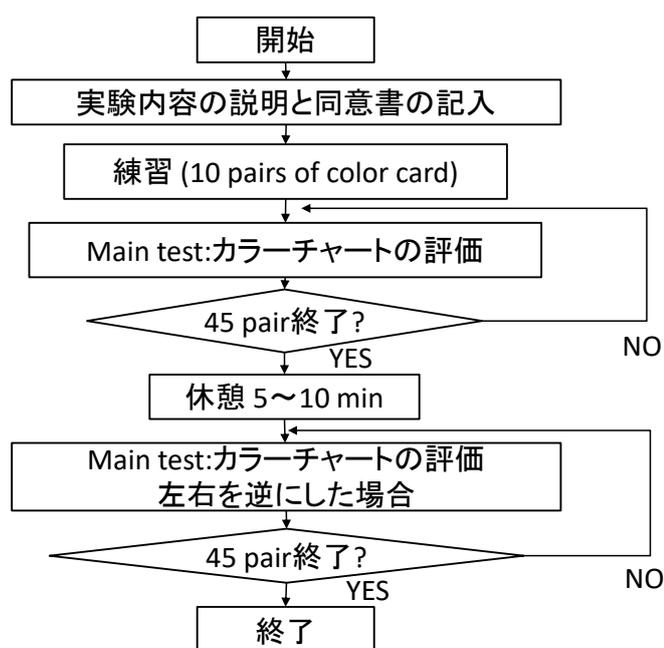


図 2-3: 色知覚実験 実験手順

2. 4. 5 被験者

10 人の Protan (5 人の Protanomaly と 5 人の Protanopia), 10 人の Deutern (2 人の Deuteranomaly と 8 人の Deuteranopia), 10 人の CNO が高彩度のカラーカードを使って実験に参加した. 同様に, 中彩度のカラーカードを使った実験には, Protan 9 名 (Protanomaly 4 名, Protanopia 5 名), Deutan 7 名 (Deuteranomaly 2 名, Deuteranopia 5 名), CNO 9 名が参加した. 被験者の年齢は 18 歳から 52 歳で, 各色覚タイプの被験者の半数以上が 20 歳から 30 歳であった. 被験者は全員日本人で, カラーユニバーサルデザイン機構(CUDO)から紹介された実験協力者, または大学生である.

色覚型に関しては, 被験者は全員, パネル D-15(図 2-4), アノマロスコープ(図 2-5), 石原式検査表, を使って 3 種によるテスト・バッテリーをおこない, 遺伝子検査による視覚色素情報の特定は行わず, 最終的な判断はアノマロスコープの結果で行った.



図 2-4:D15 テスト用チップ



図 2-5:アノマロスコープ

2. 4. 6 実験結果

高彩度グループと中彩度グループの各被験者の 45 組それぞれについて、2 回の繰り返しにおける評価スコアの平均値を算出した。その結果に対し MDS 分析を行った。MDS 分析は iso MDS Kruskal の非計量多次元尺度法を採用し、2 次元、3 次元、4 次元の際の結果を算出し最適な次元数を決定した。最適な次元数の検討の結果、CNO, Protan, Deutan とともに、次元の増加に伴って同様にストレス値が減少することが確認された。3 つのグループのストレス値の平均が 5%以下であることを考慮して、ほとんどの先行研究で採用されていた 3 次元分析の結果を本研究では解析の対象とすることと決定した。

図 2-6 は、CNO, Protan, Deutans のすべての MDS 構成を、第 1 軸と第 2 軸の平面に投影したものである。MDS の結果では、すべてのペアの距離ができるだけ相違度評価データに近くなるように点を配置されているため、軸対称の変換が可能である。余計な混乱を避けるために、カラーチップの R が 2 番目(縦)の軸のプラス側になるように設定した。第 1 軸(横軸)方向には変換を行わなかった。異なる被験者のデータシートをまとめてプロットするために、各個人の最大距離で個々のデータシートを正規化して、グラフに重ねている。また、R, G, Y, PB のカラーチップの位置を、それぞれ赤丸, 緑四角, 黄菱, 青三角で示している。

図 2-6 の左列 (a), (c), (e) は高彩度、と右列 (b), (d), (f) は中彩度のそれぞれの 3 次元の結果を 2 次元に投影したものである。図 2(a), (b) の CNO の結果はいずれも円形であり、全体的な傾向もよく似ている。第 1 軸は、ほとんどの被験者において、高彩度・中彩度ともに赤・緑反対色課程と相関していると考えられる。例外的に、高彩度では R が縦軸に近い 2 人、中彩度では R が縦軸にある 2 人の被験者がいる。高彩度の第 2 軸は、黄・青の対立と相関しているように見えるが、Y と PB の点が広範囲に散らばっていることから、単純な黄・青反対色課程ではなく、Y と PB の Munsell 値の差がかなり大きいことから、明度差と組み合わさっているのではないかと考えられる。第 3 軸のテスト刺激は、すべてのグループで明度順でも彩度順でもなく、軸の意味合いの理解は簡単なものではないことを示唆している。

図 2-6 (c), (d) に示す Protan と図 2-6 (e), (f) に示す Deutan の結果は、以下のような類似した傾向を示している。1) 高彩度、中彩度のいずれの刺激においても、ほとんどの被験者の結果は、Y と PB を端とする C-shape となっている。2) Y と PB はそれぞれ第一軸に沿って負側と正側に分布している。3) ほとんどの被験者にとって、R と G

は垂直軸の近くに集まっている。4) Protan と Deutan の被験者の両方で、数人の被験者が CNO と同じような円形状を示している。5) Protan, Deutan とともに、中彩度グループの方が高彩度グループに比べて個人差が小さいように見える。6) Protan では、高彩度に比べて中彩度の方が凹みの度合いが小さくなる。2)と3)から、大多数の CDO の第1軸は黄-青反対色をし、第2軸は黄でも青でもない何らかの色の強度を反映していると考えられる。

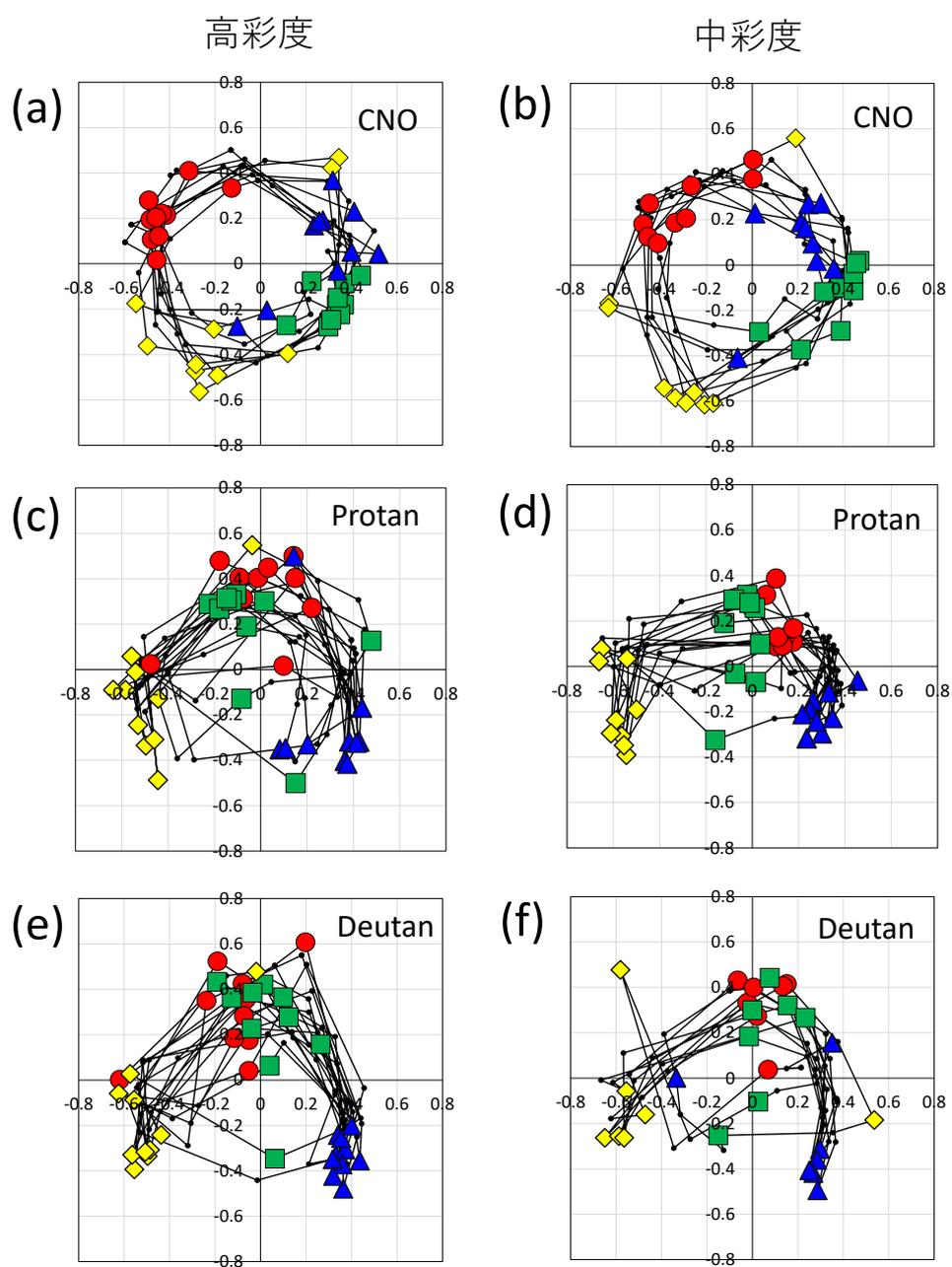


図 2-6: 高彩度, 中彩度色票実験より得られた 全被験者の知覚的色空間

2. 4. 7 Distortion Index による解析

図 2-7 は、すべてのグループで大きな個人差があることを示している。個人の MDS の形状特性を表すために、次の式で定義される Distortion Index (DI) という指標を導入した。

$$DI = \frac{\pi \cdot d_{max}^2}{4 \cdot S} \quad \dots(1)$$

ここで、S は、10 個の色の座標を結ぶ線で囲まれた領域を表し、 d_{max} は色点間の最も遠い距離を表している。DI は、MDS の結果が円形の際に 1 となり、MDS の結果が円形から歪むにつれて大きくなる。全被験者の DI 値を表 2-2 に示す。表中、(a) は CNO, (b) は Protan, (c) は Deutan のそれぞれ個人の値である。各左から被験者番号、高彩度 DI, 中彩度 DI を示す。

表 2-2: DI の個人の値

(a) CNO			(b) CDO(Protans)			(c) CDO(Deutans)		
Obs. No.	High chroma	Medium chroma	Obs. No.	High chroma	Medium chroma	Obs. No.	High chroma	Medium chroma
N10	1.25	1.22	P3	7.36	6.82	D7	6.44	-
N11	1.57	1.60	P4	4.90	11.50	D8	11.27	11.24
N12	1.66	1.46	P5	5.87	11.65	D9	3.34	14.92
N13	1.46	1.42	P7	1.97	1.95	D10	1.34	1.76
N14	1.82	-	P8	1.39	-	D11	2.89	11.45
N15	1.31	1.28	P9	3.47	11.23	D12	14.69	9.30
N16	2.05	1.54	P10	3.96	12.45	D13	1.64	-
N17	1.35	1.73	P11	15.44	5.66	D14	10.57	-
N20	1.36	1.52	P14	5.92	5.33	D17	4.96	9.73
N32	1.41	1.24	P15	9.47	9.47	D18	9.93	9.92

図 2-7 は、CNO, Protan, Deutan の各グループの高彩度カードに対する個別の MDS の 2 例と、各グループの相違度評価の平均データから得た MDS の結果である。

図 2-7 (a)~(c)は CNO, (d)~(f)は Protan, (g)~(i)は Deutan の結果である。以下、詳細に説明していく。図 2-7 (a)と(b)に示す被験者 N10 と N16 は、それぞれ 10 人の CNO の中で最小と最大の DI を示している。図に示すように、N10 の MDS 形状はほぼ円形で、テスト刺激の順序も Munsell 色相環の順になっているが、N16 のそれは局所的に不規則性がある。他の被験者の MDS 形状は、N10 と N16 の中間で、基本的には円形だが、ほとんどの場合、1つか2つの小さな凹みがある。図 2-7 (c)の相違度評価の平均データに基づく MDS 構成では、円形の形状が描かれており、10 個のチップが個々の結果よりも均一に配置されている。図 2-7 (d)~(f)は Protan の結果である。図 2-7(d)の P8 の DI 値は 1.39 で、Protan の中では最も小さく、CNO と同じような円形の形状をしている。図 2-7 (e)の P15 の結果は、CNO によく見られる典型的な凹型の形状をしている。DI は 9.47 で、P8 や CNO に比べてかなり大きく、Protan の中では 2 番目に大きい。図 2-7 (f)の平均データによる結果は、多くの Protan の被験者が指摘する特性を反映した凹形状を示している。図 2-7 (g)の D10 (DI=1.34)は、Deutan の中では最も小さく、こちらもほぼ円形である。図 2-7 (h)の D18 の結果は、DI が 9.93 の P15 と同様に凹んだ形をしている。図 2-7 (i)の Deutan の平均データに基づく結果は、C-shape を示しており、ほとんどの被験者がこの特性を Protan のグループと同様に示していることがわかる。今回の 30 人の被験者のデータにおいては、部分的な C-shape を示したケースの DI は約 2、明確な C-shape を示したケースの DI は約 5 よりも大きくなった。

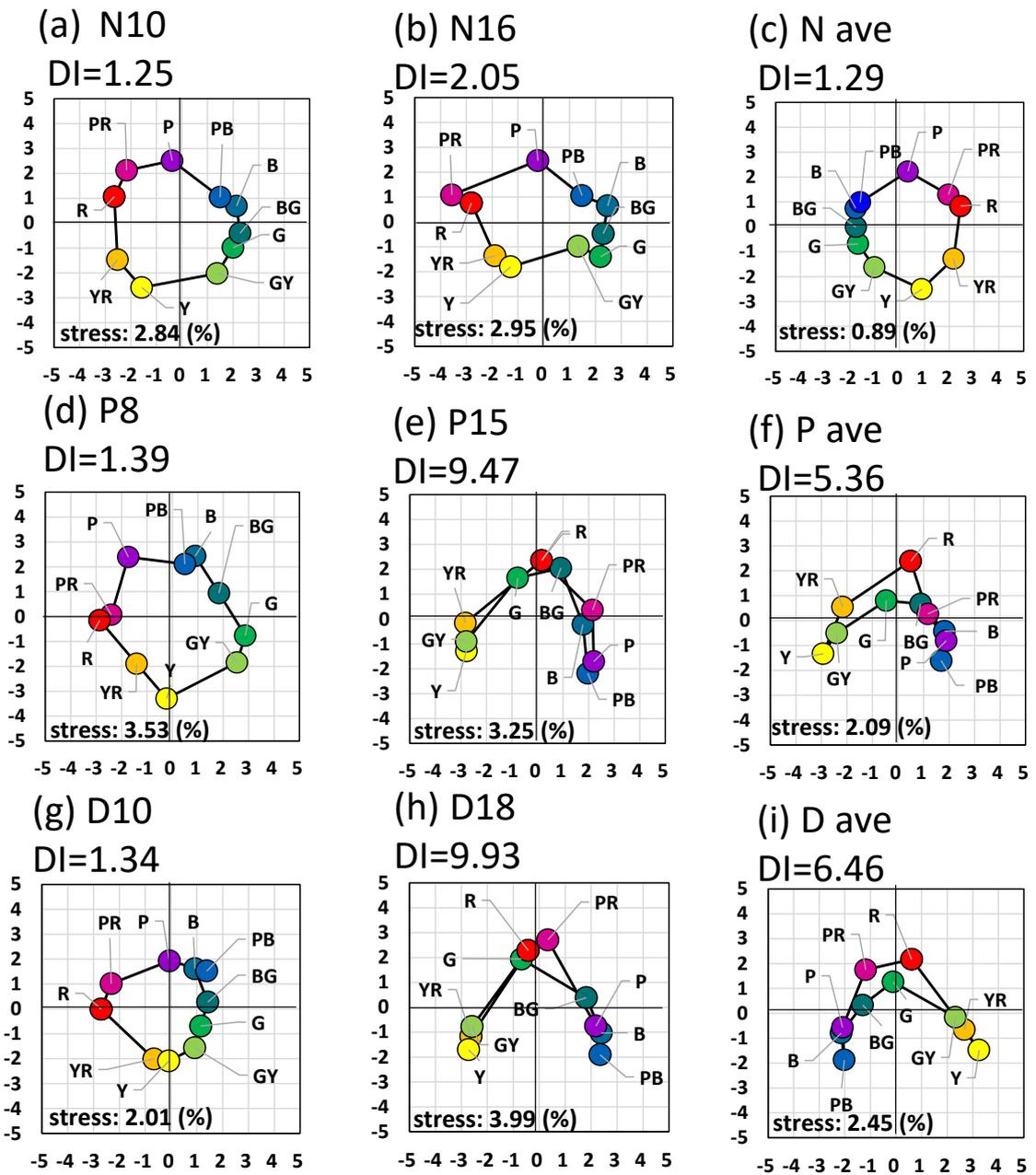


図 2-7: Normal, Protan, Deutan の 2 人の代表的な個人 MDS 結果と、平均の MDS 結果

CDO の中には、CNO と同等の DI 値を示すものがある。例えば、P8 は高彩度、P7 と D10 は高・中彩度、D13 は高彩度である（表 2-2 参照）。興味深いのは、これらの観測者がパネル D-15 テストでエラーを示さなかったことである。しかし、アノマロスコープテストでのマッチング範囲は、通常の範囲よりも確実に広く、色覚異常を示している。パネル D-15 テストでは、キャップ間の S 錐体と桿体の興奮の変化が、キャップを正しく並べるための重要な要素となる[23]。一方、N16 の DI 値が比較的大きいのは、主に N16 の相違度評価の傾向による。彼は、R 対 G, R 対 GB, R 対 B, R 対 PB のペアに 5 を、Y 対 B, Y 対 PB, Y 対 P のペアに 4, 3, 5, 4 を割り当てた結果、R-G 軸に沿って細長い楕円形の MDS 構成となり、CNO の中で最も DI が大きくなった。しかし、今回の研究では、パネル D-15 テストにおいて、Protan, Deutan, Tritan の各線に平行ではないものの、2 つの転位を示した唯一の CNO であることが注目される。

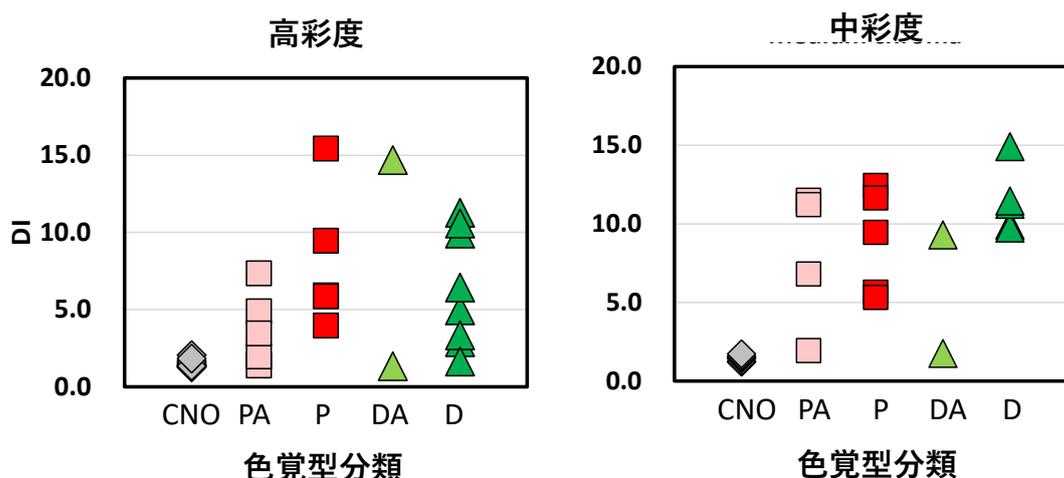


図 2-8:色知覚実験の全 DI 高彩度(左)、中彩度(右)

高彩度と中彩度のカード実験において、個々の DI の値を色覚タイプごとに分けてプロットしたのが図 2-8 である。この図からわかるように、CNO の結果は 1.5 付近の狭い範囲に集中しているのに対し、CDO の結果は高中色ともに広い範囲に分布していることがわかる。色覚タイプを被験者間因子、高・中彩度を被験者内因子とした Mixed Anova を行った。これらの統計結果を表 2-3~2-5 に示す。表 2-3 に DI に対する Mixed Anova の結果、表 2-4 に高彩度の多重比較検定、表 2-5 に中彩度の体重比較検定の結果を示す。に被験者内因子の検討には、高・中彩度の両方に参加した観察者のデータを

用い、DA (Deuteranomaly)のデータは観察者が2人しかいなかったため省略した。解析の結果、色覚タイプの主効果($F(3, 19)=32.2, p<0.001, \eta^2G=0.644$)および高・中彩度の主効果($F(1, 19)=5.79, p<0.05, \eta^2G=0.164$)が認められたが、色覚タイプと彩度の交互作用($F(3, 19)=1.70, p=0.201, \eta^2G=0.147$)は有意水準が低かった。CNOとP(Protanopia), CNOとD(Deuteranopia), CNOとPA(Protanomaly)の間のボンフェローニ補正によるp値はいずれも0.001以下であり、各CDOグループのDIはCNOのDIよりも有意に高いことがわかった。さらに、高彩度と中彩度内の色覚タイプ効果を、Planned Contrastを用いて調査した。その結果、CNOとP, D, PAの比較は、高彩度条件では($t=4.11, p<0.01$), ($t=3.49, p<0.05$), ($t=1.43, p=0.996$), 中彩度条件では($t=5.28, p<0.001$), ($t=7.08, p<0.001$), ($t=4.23, p<0.01$)となりました。このことから、中彩度条件では、CNOとCDOの各グループの違いが顕著であること、また、高彩度条件ではPAのDIがCNOのDIよりも有意に高くないことから、心的色表現の構築に彩度が影響していることがわかった。

表 2-3: 色知覚実験のDIに対する混合ANOVA

	Sum of Square	df	Mean Square	F	p	η^2_G	η^2	η^2_P
高彩度-中彩度間	55.1	1	55.1	5.79	0.026	0.164	0.062	0.233
(高彩度、中彩度)vs(色覚型)	48.5	3	16.18	1.7	0.201	0.147	0.054	0.212
Residual	180.9	19	9.52					

被験者間効果

	Sum of Square	df	Mean Square	F	p	η^2_G	η^2	η^2_P
色覚タイプ	507.2	3	169.07	32.2	<0.01	0.644	0.569	0.836
Residual	99.8	19	5.26					

表 2-4: 色知覚実験高彩度の多重比較検定

Comparison			Mean Difference	t	p	p _{bonferroni}
D	-	Nor	4.86	3.49	0.002	0.011
	-	P	-1.75	-1.05	0.305	1.000
	-	PA	2.56	1.53	0.138	0.830
Nor	-	P	-6.61	-4.11	0.000	0.002
	-	PA	-2.29	-1.43	0.166	0.996
P	-	PA	4.31	2.33	0.029	0.173

表 2-5: 色知覚実験高彩度の多重比較検定

Comparison			Mean Difference	t	p	p _{bonferroni}
D	-	Nor	10.01	7.081	0.000	0.000
	-	P	2.54	1.585	0.129	0.777
	-	PA	3.58	2.105	0.049	0.293
Nor	-	P	-7.47	-5.283	0.000	0.000
	-	PA	-6.43	-4.223	0.000	0.003
P	-	PA	1.04	0.61	0.549	1.000

2.5 色名, 相違度評価実験

2.5.1 実験概要

先行研究において, 知覚的相違度評価実験と似通った実験として, 色の名前に対しての脳内色空間の実験を行った実験がある. これらにおいて特徴的な結果として, CDO でも C-shape とならず円形となるという結果がある[8]. これらに関しても, 個人においてどのような色名の色空間をとるか個人の毎のデータが少ないため, 今回, 調査をおこなった. 実験手法に関しては, 2.4 で示した相違度評価実験と似通った部分が多いため, 対比, 引用しながら, 説明する. 結果も比較して説明していく.

2.5.2 実験刺激

実験刺激は Munsell 色相環の基本 10 色の代表名の日本語表記である.

表 2-7にその日本語表記と英語表記を順に記載する.

表 2-6: Munsell 色相環の基本 10 色の日本語表記と英語表記

Japanese color names in the answer sheet	English Translation
赤, 橙, 黄, 黄緑, 緑, 青緑, 青, 青紫, 紫, 赤紫,	Red, Orange, Yellow, Yellow-Green, Green, Blue-Green, Blue, Blue-purple, Purple, Red-Purple

2. 5. 3 実験環境

実験環境を図 2-9 に示す. 色知覚による相違度評価実験と同じ環境のブースのなかで, 無彩色の布地の机の上で, 被験者に回答していただいた. 回答は回答用紙に色名の対が記載されその横に, 水準1~5の番号が記載され, 心理的距離を, 1(非常に近い), 2(やや近い), 3(どちらともいえない), 4(やや遠い), 5(非常に遠い)の尺度で評価するように求めた.

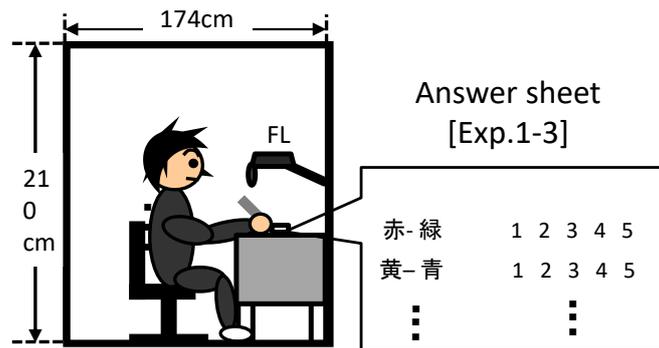


図 2-9: 色名実験環境

2. 5. 4 実験手順

実験手順を図 2-10 に示す. 実験手順は色知覚実験と同様の手順で, 実験概要の説明, 同意書の記入から始まり, 色名の練習 10 対に答えたのち, 本試験の色名 45 組, そのあと, 休憩を挟み, 左右を逆にした色対 45 個を行い, 終了となる. 1 個ごとの回答に制限時間は設けませんが, 深く

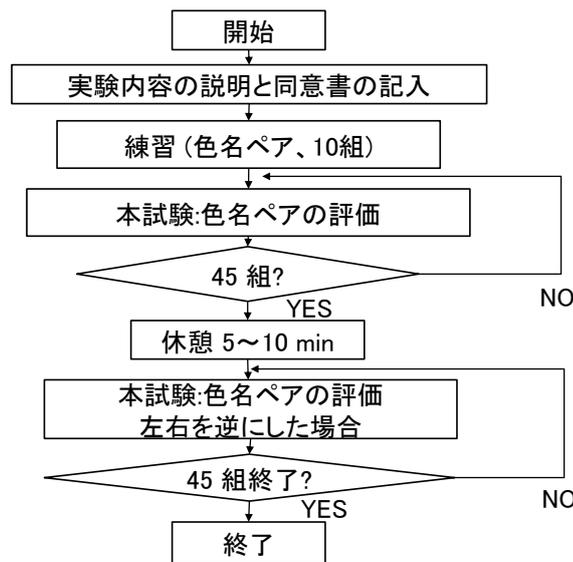


図 2-10: 色名実験のフローチャート

考えて回答するのではなく、直観的にその色名を見た比べた際に感じる近さを答えていただいた。

2.5.5 被験者

被験者は高彩度色票実験と同じ Normal 10名, Protan 10名, Deutan 10名である。

2.5.6 色名実験結果

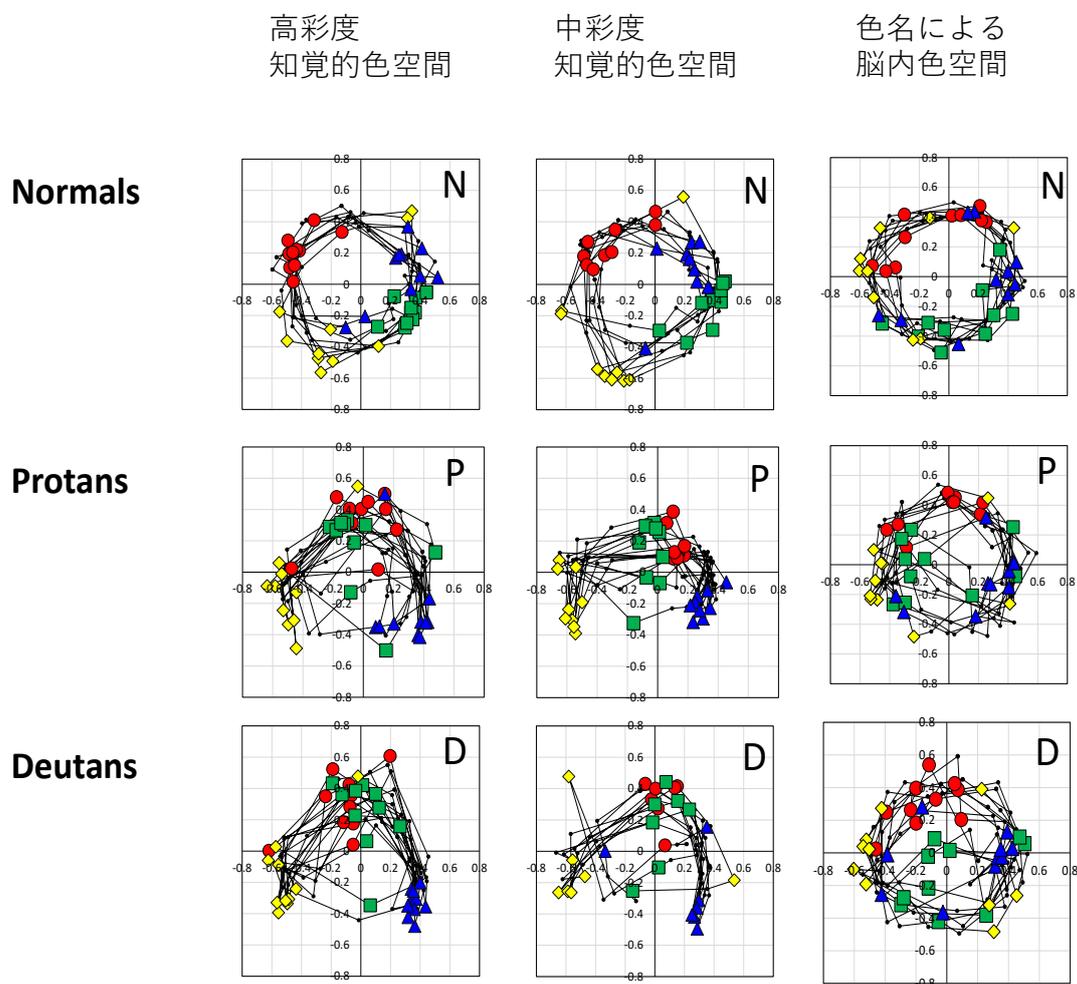


図 2-11:色名による色空間

色名による色空間の実験結果を図 2-11 に示す. 左と中央の列は比較のために用いた, 図 2-6 の再掲である. 一番左が今回の色名の色空間の結果である. 上から Normal, Protan, Deutan である. この結果わかることとしては Normal, はほぼ全員が円形で, CDO も, 色知覚の C-shape と異なり, わずかな Protan と一部の Deutan を除いて, 円形となることがわかる。

2. 5. 7 Distortion Index による比較解析

図 2-12 に既出の色知覚の DI のグラフに加え、色名の DI をグラフとして一番右に加えたグラフを示す。色名に関しては、色知覚に比べ、各色覚型の DI のばらつきも小さく DI が 5 を超える人はいない。

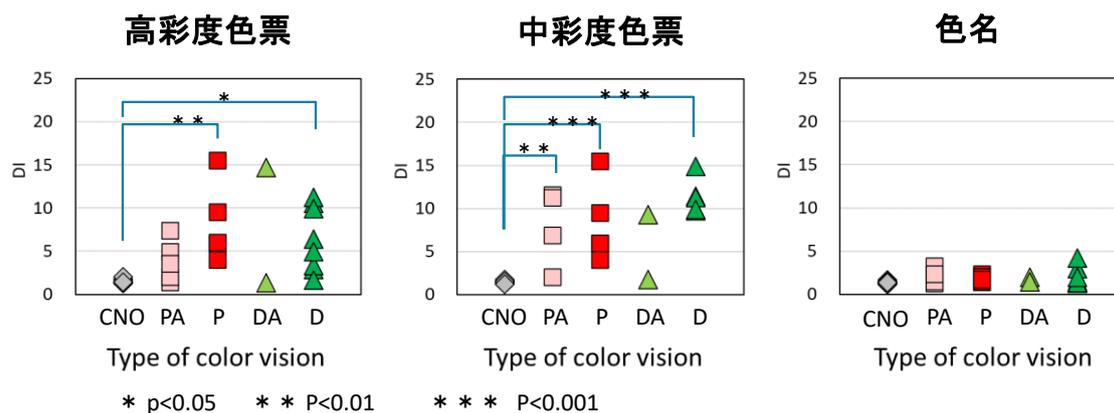


図 2-12: 試験別、色覚型別の全 DI

2. 6 第2章のまとめ

第二章まとめとしては、高彩中彩度の実験において、既出論文で記載のあった、CDO の色知覚実験での C-shape と、色名実験での円形が再現することができ、さらに、CDO において、DI を基に検討した結果、C-shape から円形までの個人間のばらつきを定量的に把握することができた。

また、色知覚実験では中彩度において Protan は Deutan より C-shape の凹みが浅いことを新たな知見として得られた。この原因などは今後原因を解明すべき課題の 1 つと考えられる。

第3章 色空間推定モデル

3.1 はじめに

我々の結果は，Shepard and Cooper [8]の CNO と CDO の結果と強い相関がある．CNO の色表現は Munsell 色相環に似ているのに対し，CDO の色表現は，Protan と Deutan の両方とも，Y と PB (Shepard and Cooper ではターコイズ)で曲がる C-shape をしており，R と G は非常に近い位置にある．このような相関関係は，20 年以上の時を経て，被験者の人種の違いや，刺激や手順の違いがあったにもかかわらず，CNO と CDO の色表現は文化的な要因に影響されず，むしろ人間の被験者が本来持っている色の感覚・知覚システムに基づいていることを示唆している．

この章では，網膜の LMS 錐体のスペクトル特性から，色覚メカニズムの後続プロセス，そして最後に脳内で発生すると思われる相違度評価プロセスまでを通すことで，CNO と CDO の色表現の個人差の推定を，試みた．このようなシミュレーションは，本研究で初めて報告されたが，今回の結果に見られる個人差を説明する潜在的な要因を理解するのに役立つと考えられる．

3. 2 個人の色空間推定モデル

3. 2. 1 シミュレーションの流れの説明

シミュレーションの流れを図 3-1 に示す. ステップ(i)から(vii)までを以下のように説明する.

- (i) LMS 錐体の吸収スペクトル(量子単位)
- (ii) LMS 錐体の分光感度への変換(エネルギー単位)
- (iii) 線形変換に基づく, 輝度(L)と 2 つの反対色課程(r/g と y/b)の導出
- (iv) カラーチップの分光反射率による積分値
- (v) カラーチップの色覚空間(Ach_k , $C_{(r/g), k}$, $C_{(y/b), k}$)へのプロットと全ペアの距離計算
- (vi) 距離から飽和関数を仮定して相違度評価を行う
- (vii) (vi)のステップを行わなかった場合の MDS 分析
- (vii)' (vi)のステップを行った場合の MDS 分析

各ステップの計算方法については、以下のセクションで詳しく説明する。

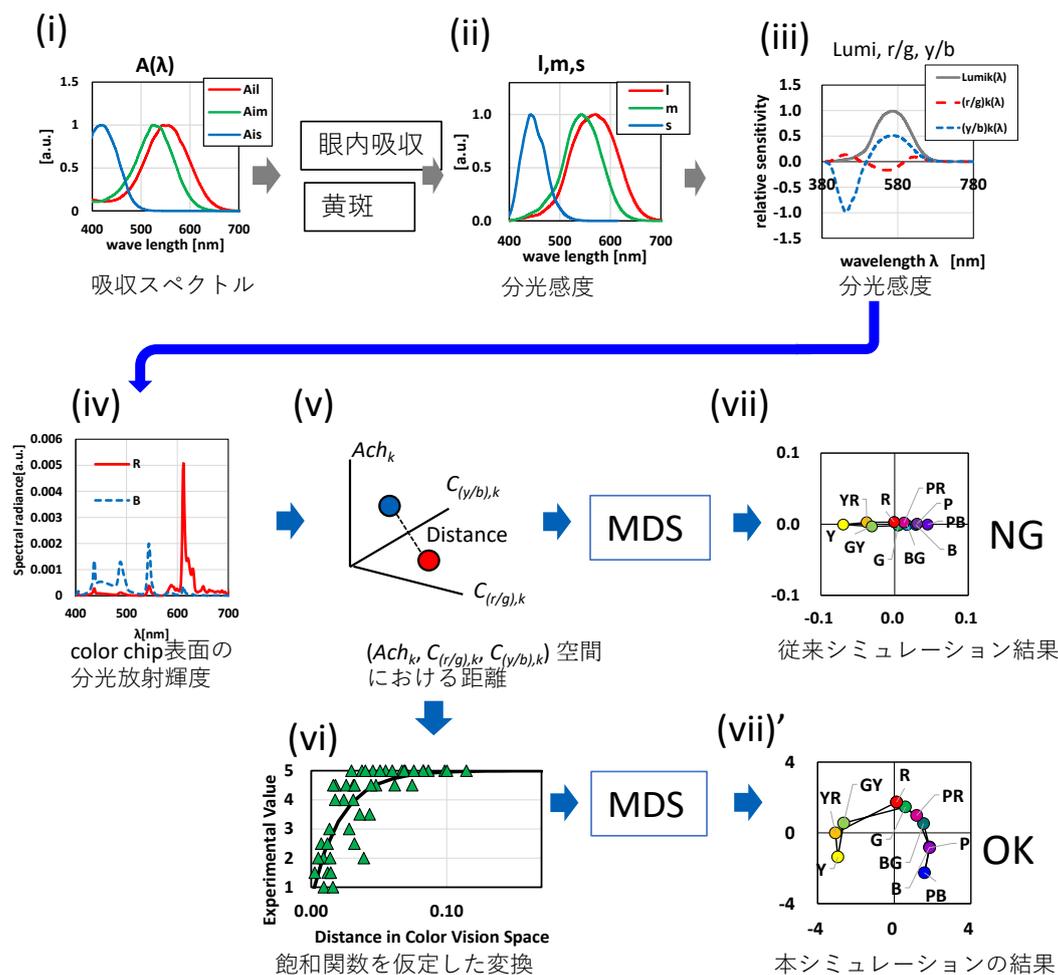


図 3-1:シミュレーションの工程フロー

3. 2. 2 錐体分光感度

矢口ら[24]は、程度の異なる CNO と CDO の色見シミュレーションを報告している。我々は、CIE の生理的色空間に関するテクニカルレポート[25, 26]で報告されているものと基本的に同じである、彼らの(i)から(iii)までの計算方法を採用した。視細胞の分光吸収スペクトルは、波数に沿ってプロットするとほぼ同じ曲線を示し(ノモグラムと呼ばれる)、視細胞間の巨大な差異はピークのシフトで表現できることが知られている[27]。シミュレーションでは、波数軸に沿った色素吸収スペクトルのピーク波長のシフトから CDO の錐体スペクトル感度を推定した。このピーク波長のシフトは、各被験者の色表現における d_{max} に対する R と G のプロット間の距離に反比例すると仮定し、L と M の錐体色素のスペクトル吸光量が重なる場合には最大で 694cm^{-1} のシフトが生じるとした。このように、R と G の距離がゼロで重なっている場合、被験者は

中～長波長領域に 1 つの錐体色素しか持っていないことになる。一方、R と G の距離がゼロでなければ、アノマロスコープテストによれば、2 色覚の、Protanopes, Deuteranopes の場合でも、被験者はその波長領域に 2 つの錐体色素を持っていることになる。この仮定は、色識別能力と色素のスペクトル分離の関係を報告した Neitz[7] の研究と定性的に一致している。近年の視覚色素の分子遺伝学の発展により、Protan 型は中・長波長領域に M と M-like な色素を、Deutan 型は L-and L-like な色素を持つことが明らかになった[5, 6]。しかし、吸収スペクトルのピークシフトを導き出すために、矢口ら[24]が採用した古典的な考え方を採用した。すなわち、計算を簡単にするために、Protanomaly は通常の M-pigment と L'-pigment を持ち、ピークが通常の L-pigment から短波長側にシフトしたものとして記述し、Deuteranomaly は L-pigment と M'-pigment を持ち、ピークが通常の M-pigment から長波長側にシフトしていると考えた。被験者 k の波数のピークシフトゼロ対値 $|\Delta v_k|$ は、以下の式(2)を用いて推定した。

$$|\Delta v_k| = 694 \cdot \left(1 - \frac{d_{RG, k}}{d_{max, k}}\right) \quad \dots(2)$$

ここで、 $d_{RG, k}$ は R と G の間の距離、 $d_{max, k}$ は被験者 k の MDS 構成における最大距離である。上述したように、 $d_{RG, k} = 0$ であれば、 $|\Delta v_k|$ は 694 となり、L'または M' の色素がそれぞれ M または L の色素と完全に重なることになる。今回の研究では、完全な重なりを示した被験者はいなかった。

CNO の場合、MDS の結果の個人差が無視できないため、通常の L 錐体と M 錐体を同じものを採用するのではなく、個々の L 錐体と M 錐体の吸光度を導き出した。また、式(3)と式(4)を用いて、L 錐体と M 錐体の色素のシフト量が同じであると仮定した。この仮定は、L 錐体と M 錐体の両方の色素の変動がカラーマッチングの結果を説明するために示唆されている文献[28]から、不適切ではないと思われる。

波数軸方向のシフト値量を求めた後、被験者 k の S 錐体を含む 3 錐体の分光吸光曲線を以下のように求めた。

$$\log A_{L, k}(v) = \log A_L(v - |\Delta v_k|) \quad \dots(3)$$

$$\log A_{M, k}(v) = \log A_M(v + |\Delta v_k|) \quad \dots(4)$$

$$\log A_{S, k}(v) = \log A_S(v) \quad \dots(5)$$

計算にあたっては、CIE170-1 の基本テンプレート関数を用いて、正常な L, M, S 色素のピーク波数をそれぞれ 17538cm^{-1} , 18423cm^{-1} , 22619cm^{-1} とした。これらを、従来の研究[24, 25]と同様に、黄斑色素と眼内の吸収を考慮して、波長に沿ったエネルギー単位の分光感度曲線に変換した。そして、すべての分光感度曲線をピーク波長で規格化し、後の式に登場する $l_k(\lambda)$, $m_k(\lambda)$, $s_k(\lambda)$, と表記した。前述の正常な L, M, S 色素を持つ錐体の分光感度のピーク波長は、それぞれ 570.2nm , 542.8nm , 442.1nm である。

3. 2. 3 Luminance, r/g, and y/b 空間内のカラーチップの距離

次に、10 個のカラーチップについて、Lumi, r/g, y/b と表記された輝度、赤/緑、黄/青の各チャンネルの出力を計算する。錐体の分光感度を線形変換して分光輝度感度を表現し、反対色チャンネルの応答関数は、矢口らの研究[24]で用いられたものと基本的に同じであり、式(6)~(8)で示される。

$$Lumi_k(\lambda) = 0.6889 \left(\frac{L_{EEW}}{L_{EEW,k}} \right) \cdot l_k(\lambda) + 0.3483 \left(\frac{M_{EEW}}{M_{EEW,k}} \right) \cdot m_k(\lambda) \quad \dots(6)$$

$$(r/g)_k(\lambda) = 0.8388 \left(\frac{L_{EEW}}{L_{EEW,k}} \right) \cdot l_k(\lambda) - 1.1191 \left(\frac{M_{EEW}}{M_{EEW,k}} \right) \cdot m_k(\lambda) + 0.1514 \cdot S_k(\lambda) \quad \dots(7)$$

$$(y/b)_k(\lambda) = 0.3566 \left(\frac{L_{EEW}}{L_{EEW,k}} \right) \cdot l_k(\lambda) + 0.1800 \left(\frac{M_{EEW}}{M_{EEW,k}} \right) \cdot m_k(\lambda) - S_k(\lambda) \quad \dots(8)$$

上記の式において、添え字の EEW は等エネルギー白色を表している。 L_{EEW} , M_{EEW} の項は、ピーク感度波長がそれぞれ 570.2nm, 542.8nm, 442.1nm の LMS 錐体を持つ標準的な正常 3 色覚の等エネルギー白色の刺激値である。 $L_{EEW,k}$ と $M_{EEW,k}$ は被験者 k のもので、等エネルギー白色は色覚タイプに関係なく、どの被験者でも白く見えるはずだという概念のもと、式を正規化するために導入されたものである。 $l_k(\lambda)$, $m_k(\lambda)$, $s_k(\lambda)$ は、それぞれ被験者 k の L, M, S 錐体の分光感度である。

図 3-2 に Lumi, r/g, y/b チャンネルの分光応答関数 (左), と 10 カラーチップの布置 (右) を示す。 Lumi の代表的な分光感度と, r/g および y/b の分光応答関数を, 図 3-2 の左(a),(c),(e)のグラフに示す。また, 3 つの色覚タイプの代表的な被験者の感度を図 3-2 の中列に示す。図 3-2 の右(b),(d),(f)に r/g,y/b 空間への各カラーカードの分光結果からの布置の図を示す。上から Normal, Protan, Deutan の代表例である。図 3-2(a)に示すように, 被験者 N10 では, r/g のスペクトル応答関数の振幅が y/b のそれよりも小さいため, 実験データに適合させるためには $w_{r/g}=4.40$ が必要であった。表 3-1 に全員の結果を示してあるが,それを見ると分かるように, 他の CNO についても同様に, $w_{r/g}$ は 3.01 から 6.47 の範囲で, 平均は 4.33 であったことがわかる。図 3-2 (c)と (e)に示す P15 と D18 の r/g の振幅は, N10 の結果と比較して小さく, それぞれ $w_{r/g}$ は 1.05 と 0.55 であり, 赤/緑チャンネルの反応が弱いことを示している。Protans と

Deutans の平均値と $w_{r/g}$ の範囲は、それぞれ 1.51, 0.55~3.22, 0.84, 0~3.36 である。

そして、実験照明環境下で測定された各カラーチップの分光放射輝度に、上記の波長ごとの分光関数を掛け、可視光域全体で積分し、適切な重みを掛けて、相違度評価に採用されたカラーチップの 3 チャンネルの出力を以下のように導き出した。

$$Ach_{k,i} = w_{Lumi,k} \cdot \int Lumi_k(\lambda) \cdot E_i(\lambda) d\lambda \quad \dots(9)$$

$$C_{(r/g),k,i} = w_{(r/g),k} \cdot \int (r/g)_k(\lambda) \cdot E_i(\lambda) d\lambda \quad \dots(10)$$

$$C_{(y/b),k,i} = w_{(y/b),k} \cdot \int (y/b)_k(\lambda) \cdot E_i(\lambda) d\lambda \quad \dots(11)$$

ここで、 $w_{Lumi,k}$, $w_{(r/g),k}$, $w_{(y/b),k}$ は、それぞれ被験者 k の輝度、 r/g , y/b チャンネルの重み付け係数である。本研究では、以下の理由から $w_{(y/b),k}=1$ に固定した。まず、最初は $w_{Lumi,k}=1$, と設定したが、高彩度条件ではすべての被験者で $w_{Lumi,k}=0$ が最適なフィッティングとなった。また、 y/b チャンネルの相違度評価への寄与は、 r/g に比べて被験者ごとのばらつきが少ないことがわかった。そのため、 $w_{(y/b),k}=1$ と仮定しても、比較的包括的な結果が得られる。式(9)-(11)において、 $E_i(\lambda)$ は、実験環境におけるカラーチップ i の表面からの分光放射分布を表す。なお、 Ach_k , $C_{(r/g),k}$, $C_{(y/b),k}$ は、個別の重み付け係数を持つ 3 つのチャンネルの出力である。図 3-2 では、 $(C_{(r/g),k}$, $C_{(y/b),k})$ 面上の 10 個のカラーチップの $w_{Lumi,k}$, $w_{(r/g),k}$, $w_{(y/b),k}$ の値を、図 3-2 の中央の列に示している。10 個のチップは、すべての被験者にとって Munsell 色相環と同じ順序で配置されているが、CDO のレイアウトは垂直な $C_{(y/b),k}$ 軸に沿って細くなっている。

そして、被験者 k の異なる 2 つのカラーチップ i と j ($i, j = 1, 2, \dots, 10$, ただし $i \neq j$) の間の距離 $D_{k,ij}$ を以下のように算出した。

$$D_{k,i,j} = \sqrt{(Ach_{k,i} - Ach_{k,j})^2 + (C_{(r/g),k,i} - C_{(r/g),k,j})^2 + (C_{(y/b),k,i} - C_{(y/b),k,j})^2} \quad \dots(12)$$

まず、45 組で得られた距離 $D_{k,ij}$ をそのまま MDS 分析に入力したが、CDO の MDS 配置は、図 3-1 の(vii)に示すように、凹型ではなく、平らな楕円形にしかならなかった。これは、 $(Ach_k, C_{(r/g),k}, \text{ and } C_{(y/b),k})$ 空間の距離から、次節で述べるように、相違度評価のスコアへの何らかの変換が必要であることを示唆している。

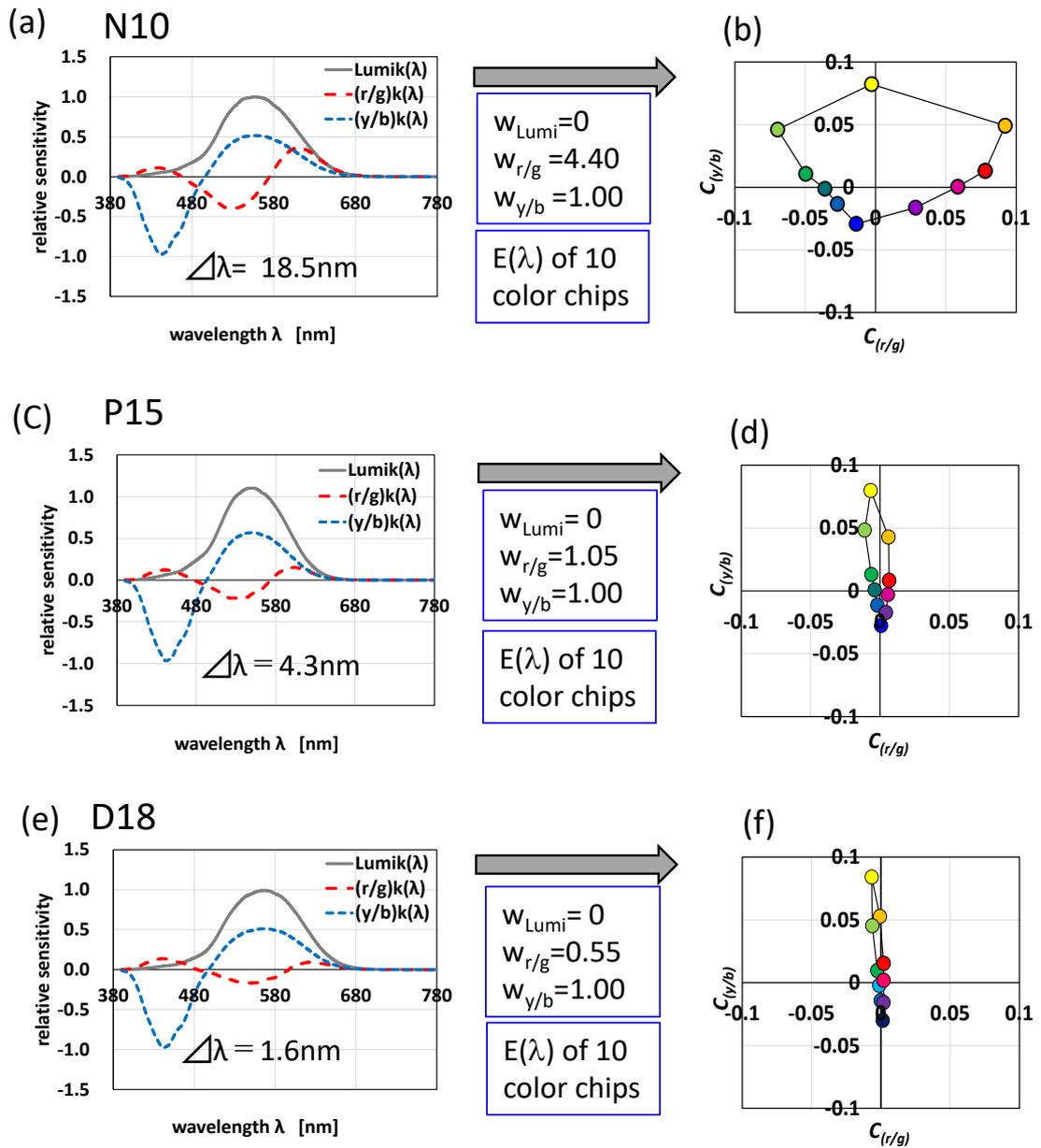


図 3-2: Lumi, r/g, y/b チャンネルの分光応答関数(左), と 10 カラーチップの布置(右)

3. 2. 4 Ach, C(r/g), C(y/b) 空間での距離から相違度評価への変換

(Ach_k , $C_{(r/g),k}$, $C_{(y/b),k}$) 空間における距離と、相違度評価のスコアとの関係を示した結果の例を、図 3-1(vi)と同様に、図 3-2 の左列に示す。図 3-2 の 3 つのグラフは、図 11 中の 3 人と同じ被験者の結果を示している。点は大きく散らばっているが、全体的な傾向としては、色覚タイプにかかわらず、すべての被験者において、空間内の距離が長くなるにつれてスコアが大きくなっている。これらは線形関数でフィッティングできないように分布し、一定の値に漸近する非線形の飽和曲線のほうが、適した分布に見える。この非線形の飽和傾向は、CDOの方がCNOよりも特徴的に現れている。これは、式(9)~(11)の輝度、r/g, y/b チャンネルの重みづけをした出力では、相違度評価の結果を十分に表現できないことを示している。このように、CDOはCNOよりも高いスコア(例えば4や5)を割り当てる傾向があった。これらの結果をもとに、式. 13 で表される飽和曲線を採用して、個々の結果を適合させた。

$$EV_k = 5 - \alpha_k \cdot 10^{(-\beta_k x)} \quad \dots(13)$$

ここで、 EV_k は差分スケーリングの予測評価値、 x は(Ach_k , $C_{(r/g),k}$, $C_{(y/b),k}$)空間における距離、 α_k と β_k は被検者 k の曲線の形を決める定数である。定数 α_k は $x=0$ の際の EV_k の切片に対応した値であり、実験で採用した最大スコアは 5 であったが、各被験者の結果に最もフィットするように α_k の値を自由に決定した。定数 β_k は、曲線の増加量を決定する。後述するように、CDOはCNOよりも β_k の値が大きいものが多くなった。

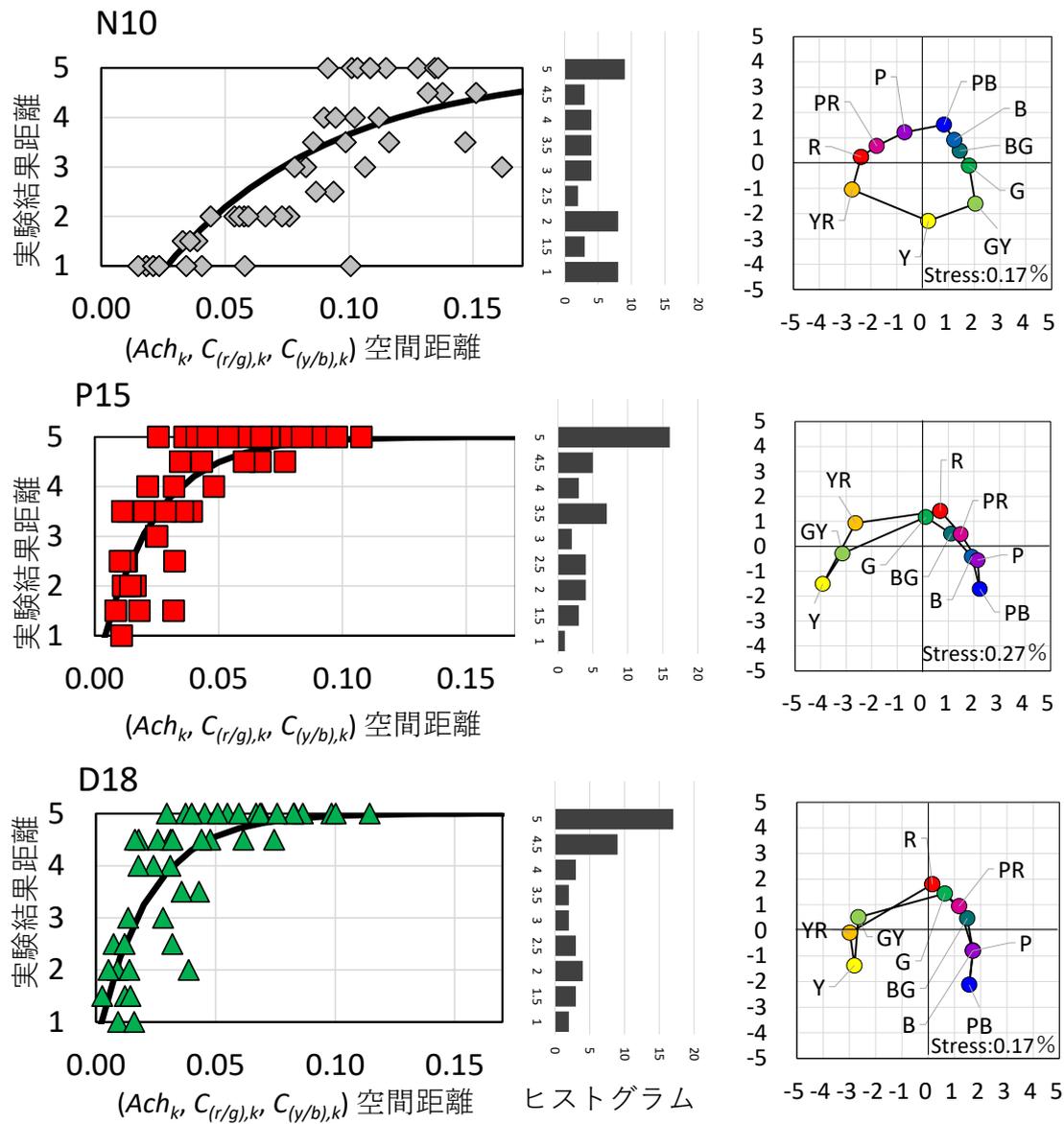


図 3-3: 飽和曲線と、飽和曲線を用いて得られたシミュレーション値からの MDS 結果

3.3 個人の色空間の Fitting 解析

個々の被験者に対して決定される定数は、 w_{Lumi} , $w_{r/g}$, α , β , の4つである。これらの定数は、 $(A_{chk}, C_{(r/g),k}, C_{(y/b),k})$ 空間の距離に対して相違度評価実験のスコアをプロットしたグラフにおいて、最もフィットするように決定した。言い換えれば、図 3-3 の左欄に示したグラフにおいて、データポイントと予測曲線の垂直方向の差の二乗和が最小になるように決定した。横軸の45組の値は $w_{Lumi,k}$ と $w_{r/g,k}$ を用いた式(12)、縦軸の値は α_k と β_k を用いた式(13)でそれぞれオブザーバーkについて決定した。4つの定数の最適な組み合わせは、線形計画法の一般化縮小勾配法を用いて、最適な $w_{Lumi,k}$ と $w_{r/g,k}$ の組み合わせと α_k と β_k の組み合わせを交互に10回探索し、一定の定数値に収束することを確認して決定したものである。図 3-3 の左列のグラフの実線の曲線は、それらの被験者の予測関数を示している。高彩度チップの結果に対する各被験者の $w_{r/g}$, α , β の値を表 3-1 に示す。前述のとおり、すべての被験者で $w_{Lumi}=0$ が得られたため、表 3-1 には示していない。予測した EV 値と実験で得られた評価点との相関係数 R を右端の列に示した。CNO, Protans, Deutans の R の平均値は、それぞれ 0.82, 0.83, 0.80 で、総平均値は 0.82 となり、3つの色覚タイプのいずれにおいても、推定が良好に行われていることがわかった。

同様の計算を、 $(A_{chk}, C_{(r/g),k}, C_{(y/b),k})$ 空間での距離と相違度評価スコアとの間の一次関数を用いて、すべての被験者について個別に行った。その結果、CNO, Protan, Deutans の平均相関係数はそれぞれ 0.80, 0.79, 0.75 となり、前述の非線形関数を用いた場合よりも相関の度合いが悪くなった。色覚タイプを被験者間因子、非線形および線形シミュレーションを被験者内因子とする二元混合 ANOVA を適用した。その結果、シミュレーションの主効果($F(1, 27)=39.8$, $p<0.001$, $\eta^2G=0.082$)と色覚タイプの主効果($F(2, 27)=0.718$, $p=0.497$, $\eta^2G=0.048$)が見られ、非線形性の導入がデータの適合性を高めるのに有効であることがわかった。グループ間のペア比較を調べると、Normal, Protan, Deutan の Linear vs. Nonlinear は、それぞれ($t=1.726$, $p=1.000$), ($t=4.092$, $p=0.005$), ($t=5.113$, $p<0.001$)であった。これは、この非線形変換が CDO のケースに特に有効であることを示している。(表 3-2, 3-3)。

式(13)を用いて45組の EV 値を予測し、MDS 分析に用いた。図 3-3 の右欄には、シミュレーションで得られた差分スコアの推定値から導き出された、N10, P15, D18 の観測者の MDS 形状が示されている。N10 の円形、P15 と D18 の C-shape は、図 2-7 に示した実験結果と同等の推定値を示している。

中彩度条件(付録 A)では、高彩度条件と全く同じ計算方法で、最終段階に非線形

変換を導入した結果、全ての観測者において実験評価点と予測 EV 値の間に良好な相関が得られた。中彩度条件における CNO, Protan, Deutans の実験評価点と予測 EV 値の間の R の平均値は、それぞれ 0.87, 0.92, 0.93 で、総平均値は 0.90 と、高彩度条件と同程度の良好な結果となった。Protan は 9 人中 7 人、Deutan は 7 人中 4 人が $w_{Lumi,k}$ が 0 でないことから、中彩度条件ではカラーチップ間の輝度差が差のスケールリングにわずかに寄与しているが、高彩度条件では寄与していないことがわかった。CNO の場合は、高彩度条件と同様に全員が $w_{Lumi}=0$ であった。

表 3-1: 個人高彩度色知覚色空間の差異を示すパラメータ群

Subject		Experiment	Simulation					Correlation coefficient
		Relative distance between R and G	Estimated wavelength separation	Weighting coefficients of luminance, r/g, and y/b		Constants in the equation (3)		
No	Type	DR	$\Delta\lambda$	$W_{r/g}$	$W_{y/b}$	α	β	R
N10	N	93.1%	18.5	4.40	1	5.92	6.45	0.806
N11	N	72.8%	14.5	4.63	1	4.85	5.53	0.777
N12	N	84.8%	16.8	3.70	1	5.87	7.45	0.860
N13	N	86.1%	17.1	3.72	1	5.42	6.45	0.791
N14	N	65.2%	12.9	3.29	1	5.20	8.30	0.879
N15	N	92.1%	18.3	3.01	1	5.86	7.29	0.836
N16	N	86.9%	17.3	6.47	1	5.34	4.76	0.758
N17	N	96.0%	19.1	4.03	1	5.75	7.12	0.828
N20	N	81.3%	16.2	6.24	1	4.79	4.72	0.773
N32	N	93.7%	18.6	3.80	1	5.39	7.40	0.866
P3	PA	42.2%	8.2	0.55	1	4.62	11.86	0.856
P4	PA	20.8%	4.0	1.38	1	4.64	7.95	0.839
P5	P	21.7%	4.2	1.47	1	6.01	14.28	0.852
P7	PA	61.5%	12.0	2.13	1	4.90	7.25	0.778
P8	PA	95.9%	19.0	3.22	1	5.86	7.83	0.849
P9	PA	26.4%	5.1	1.05	1	4.47	11.33	0.845
P10	P	52.1%	10.2	1.31	1	5.68	21.11	0.776
P11	P	11.3%	2.2	1.40	1	5.08	18.59	0.851
P14	P	15.1%	2.9	1.54	1	4.88	23.74	0.833
P15	P	22.4%	4.3	1.05	1	4.72	19.32	0.822
D7	D	32.9%	6.7	0.18	1	4.08	12.85	0.844
D8	D	8.8%	1.8	0.00	1	3.71	7.65	0.883
D9	D	41.5%	8.4	0.00	1	2.45	26.84	0.683
D10	DA	89.7%	17.9	3.36	1	4.64	6.83	0.725
D11	D	39.9%	8.1	1.45	1	3.44	7.41	0.644
D12	DA	20.3%	4.1	0.69	1	4.53	9.78	0.944
D13	D	96.4%	19.2	1.46	1	4.44	5.94	0.801
D14	D	10.1%	2.1	0.00	1	3.97	15.34	0.848
D17	D	10.9%	2.2	0.70	1	5.26	19.61	0.867
D18	D	7.9%	1.6	0.55	1	4.37	19.93	0.805

表 3-3:相関係数 R に対する Repeated Measure Anova

Repeated Measure Anova								
Within Subjects Effects								
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p	η^2_G	η^2	η^2_p
Linear-Nonlinear	0.02313	1	0.02313	39.83	<.001	0.082	0.077	0.596
Color vision Type	0.013	2	0.0065	0.718	0.497	0.048	0.043	0.051
Interaction effect	0.00351	2	0.00175	3.02	0.066	0.013	0.012	0.183
Residual	0.2444	24	0.00905					

表 3-2:相関係数 R に対する Post Hoc Comparisons

Post Hoc Comparisons - RM Factor 1 * A									
Comparison					Mean Difference	SE	df	t	$p_{bonferroni}$
RM Factor 1	A		RM Factor 1	A					
NonLinear	N	-	NonLinear	P	-0.0127	0.0278	27	-0.457	1.000
		-	NonLinear	D	0.013	0.0278	27	0.468	1.000
		-	Linear	N	0.0186	0.0108	27	1.726	1.000
		-	Linear	P	0.0314	0.031	27	1.012	1.000
	P	-	Linear	D	0.0681	0.031	27	2.194	0.555
		-	NonLinear	D	0.0257	0.0278	27	0.925	1.000
		-	Linear	N	0.0313	0.031	27	1.009	1.000
		-	Linear	P	0.0441	0.0108	27	4.092	0.005
Linear	D	-	Linear	D	0.0808	0.031	27	2.604	0.222
		-	Linear	N	0.0056	0.031	27	0.18	1.000
		-	Linear	P	0.0184	0.031	27	0.593	1.000
		-	Linear	D	0.0551	0.0108	27	5.113	<.001
	N	-	Linear	P	0.0128	0.034	27	0.377	1.000
		-	Linear	D	0.0495	0.034	27	1.457	1.000
		-	Linear	D	0.0367	0.034	27	1.08	1.000
		-	Linear	D	0.0367	0.034	27	1.08	1.000

中彩度条件では、高彩度条件と全く同じ計算方法で、最終段階に非線形変換を導入した結果、全ての被験者において実験評価点と予測 EV 値の間に良好な相関関係が得られた。中彩度条件における CNO, Protan, Deutans の実験評価点と予測 EV 値の間の R の平均値は、それぞれ 0.87, 0.92, 0.93 で、総平均値は 0.90 と、高彩度条件と同程度の良好な結果となった。Protan は 9 人中 7 人、Deutan は 7 人中 4 人が 0 でない wLumi, k を示し、中彩度条件では高彩度条件に比べてカラーチップ間の輝度差が差のスケールに強く寄与していることがわかった。CNO のシミュレーションでは、このような被験者は見られなかった。

3.4 第3章のまとめ

CNO, Protans, Deutans の色表現は、共通した一つのモデル利用して、形を説明できるようになった。これは、人間の色覚メカニズムを錐体色素の吸収から輝度・反対色のコーディングレベルまで様々なレベルで考慮し、これまでに報告された視覚色素、生理学、心理物理学の知見の蓄積に応じて個人の変動パラメータを入れたことが、良好な適合性を得た理由の一つである。また、個々の (Ach, C(r/g), C(y/b))空間の距離から非線形飽和関数を相違度評価に含めることで、よくフィットした C-shape を再現することができた点は、注目すべき結果と言える。しかし、フィッティングは完璧に実験結果の色の位置を示せてはいない。理由はいくつか考えられるが、一つは被検者の生理的要因、例えば錐体色素の遺伝、黄斑色素や眼球の吸収特性、心理物理学的要因など分光輝度感度や反対色応答など、未測定なものの影響による。これらのデータを得ることができれば、よりよいフィッティングが行えると考えられる。

第4章 CNO と CDO のカラーネーミング

4.1 はじめに

CDO の視覚特性および錐体の波長特性を基にしたシミュレーション結果などから、可視域の中波長から長波長領域の波長弁別能が低いことや、一般色覚者には緑、黄色、橙、赤と呼ばれる色刺激群についての弁別能力が低いことが知られている[1,2]. それにもかかわらず、赤いものを“赤い”，緑の物を“緑”と、的確に言い当てられる (Shepard & Cooper[8], Jameson & Hurvich[9], Paramei[14], Bonnardel[16], Lillo, et al.[17]). 彼らは、それぞれの研究においてこのことを示している. この見たものにその色名を付与するという行動は、一般にカラーネーミング(色命名)と呼ばれる行為で、色の知覚をおこない、脳内の意識の中で、脳内に蓄えている色の言語のデータベースから、自分で見ている、目の視細胞が受ける色刺激に該当した名前を選び出し、それを表現している. すなわち、知覚的色空間と、色名による脳内色空間の両方を介する行為と考えられる. 仮に、知覚的色空間と色名の脳内色空間の形が類似しており対応関係が明確な場合は、知覚刺激に対応する色の名前を言えばよい. しかし、CDO のように、知覚的色空間と色名の脳内色空間の形が異なる場合、どのように両者を統合もしくは融合させて色命名を行っているのだろうか. このような疑問より、色命名における知覚的色空間と色名による脳内色空間の、2 つの関係を調べるために、両方の脳内色空間を利用すると想定されるカラーネーミング実験をおこなった. 得られた結果を、先に取得した色空間情報を基に解析を行い、カラーネーミングの仕組みを考察した.

4.2 カラーネーミング実験

4.2.1 実験概要

カラーネーミング実験とは、色票を見て、色名を答える実験である。具体的には見た色に対して自由な名前を1つ回答するフリーネーミング実験と、Basic Color Term (BCT)と呼ばれる成熟した言語に共通する11色の色名[29]から適切な色名を選ぶカラーネーミング実験（以降制限BCT実験と呼ぶ）の2種類をおこなった。

ここで、BCTの特徴とカラーネーミングの関係について説明する。Boynton[30]はカラーネーミングの結果を特徴づける3つの指標を提案している。一貫性、一致性、および応答時間である。一貫性とは同じ被験者で、複数回試験をしても、同じカラーネーミングをすること。一致性とは異なる被験者で同じネーミングをすることを指す。BCTの11色名は、一般色覚被験者群での実験の場合、他の色名に比べて高い一貫性と一致性を示し、応答時間は短い。また、多数の色票群を用いた場合には、複数枚が同一色名となるが、その色名に該当する典型的な色の色票をフォーカルカラーと呼ぶ。

4.2.2 実験刺激

実験刺激は、相違度判定実験で用いたものと同じ、高彩度と中彩度の2グループ(2群, 2デッキなどとも呼ぶ)各10枚を用いた。(表1)。色票自体は、相違度判定実験の際の形をしていて、色チップが対になっているため、片側を、グレーの紙で隠し、1つのカードにおいて観察するのは単色の色刺激となるようにした(図4-1)。

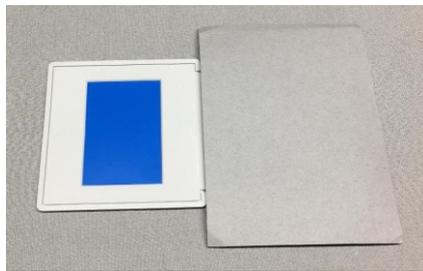


図4-1: カラーネーミング実験のカラーカード

4. 2. 3 実験環境

実験環境は相違度判定実験と同じ場所を利用した。

4. 2. 4 実験手順

フリーネーミング実験は、高彩度群，中彩度群ごとにおこなう。一枚のカラーチップを被験者の前の机の上に提示し，解答用紙の空欄に自由な名前でその色の名前を記入してもらう。これを各色ランダム 10 枚に示す。1 枚の回答に要する時間は特に制限は設けないが，それぞれの人がおおよそ 1 枚 10 秒から 20 秒で回答した。この試験を，時間を空けて 2 セットおこなった。

制限 BCT 実験は見た刺激に対して，評価語として BCT である，赤，橙，黄，緑，青，ピンク，紫，茶，白，黒，灰の 11 色から 1 色を選ぶ。フリーネーミング実験と同様，高彩度，または中彩度の色票を色刺激として，10 枚の色票をランダムに呈示して，各色票の色刺激より，その色が何色なのか BCT から選択する。こちらも，制限時間は設けないがおおよそ 1 枚 10 秒から 20 秒程度で解答された。

制限 BCT 試験も，高彩度，中彩度とも，時間を空けて各 2 回ずつ行った。

4. 2. 5 被験者

被験者は Protan Deutan Normal とともに各 5 名に参加いただいた (表 4-1)。

表 4-1: カラーネーミング実験の被験者

Color Vision Type		Exp.2-1	Exp.2-2
		Color naming	
		Free	Constrained
CDOs	Protan	5 (P:3, PA:2)	
	Deutan	5 (D:5)	
CNOs	Normal	5	

4.3 実験結果

次に実験結果を示す。まずフリーネーミング実験の結果を示す。

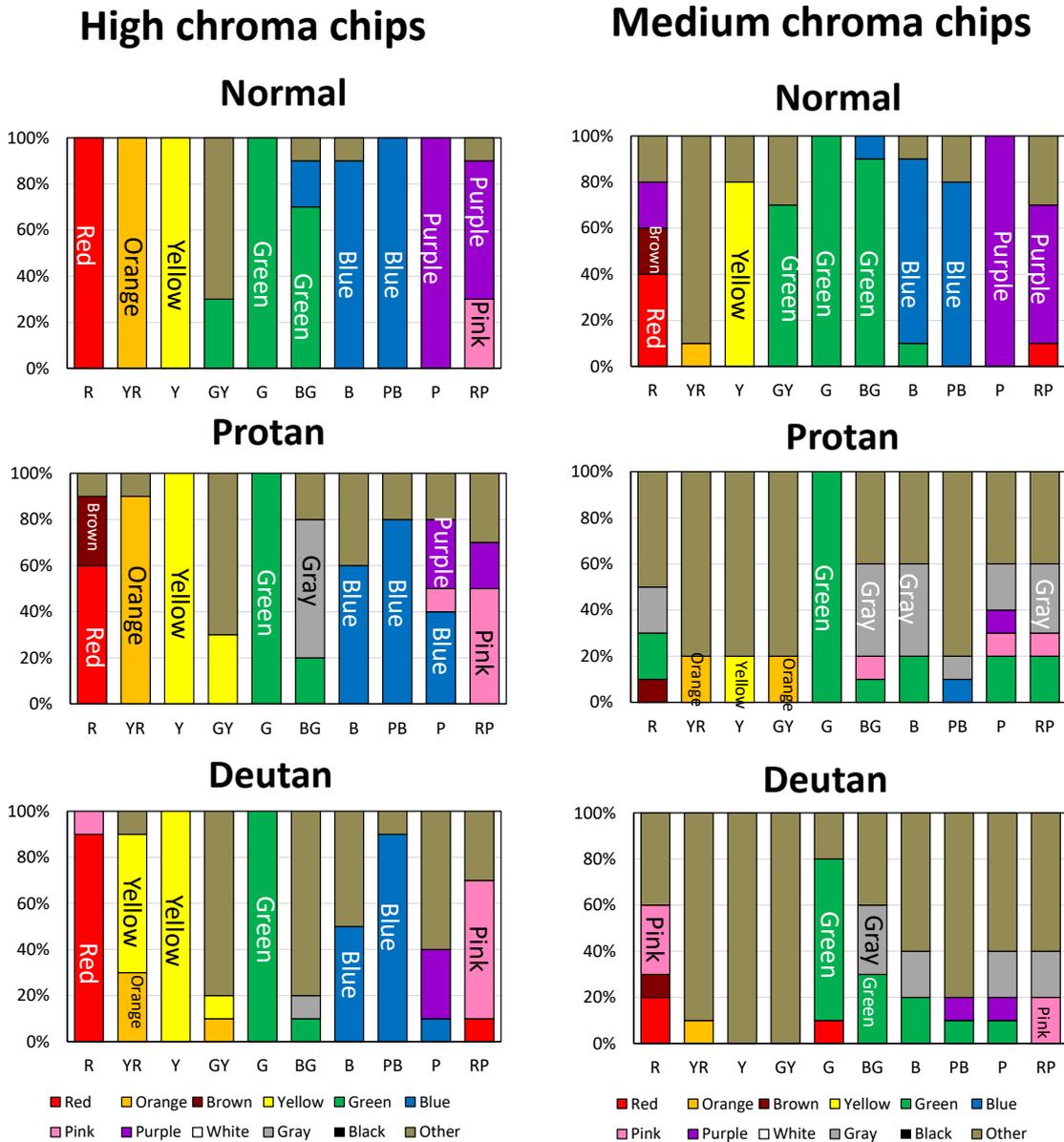


図 4-2:フリーネーミング実験結果

図 4-2 はフリーネーミング実験の結果である。左が高彩度,右が中彩度, 上から, Normal, Protan, Deutan の結果である。グラフは, 各カラーカード刺激に対する色名を示している。縦軸は 5 人の観察者×2 回の繰り返し=10 回の結果を 100%として表している。

横軸はカラーカードの各知覚刺激を示している。グラフ中 Other 以外は、BCT の 11 色と同じ色名だったものを色で示してある。高彩度において、どの色覚も緑と黄色は 100% 共通の解が得られている。CDO を見ると CDO も高彩度では赤と緑を逆の名前で呼ぶ人は一人もいなかった。それに対し中彩度では、Deutan で 1 人のみ、しかも 1 回だけ緑を赤と回答している。もう一回行った際は緑と回答している。

中彩度では全体通して同じ名前でも 100% 呼ばれたものは Normal の G, P, Protan の P のみであった。

次に、制限 BCT の結果について示す。

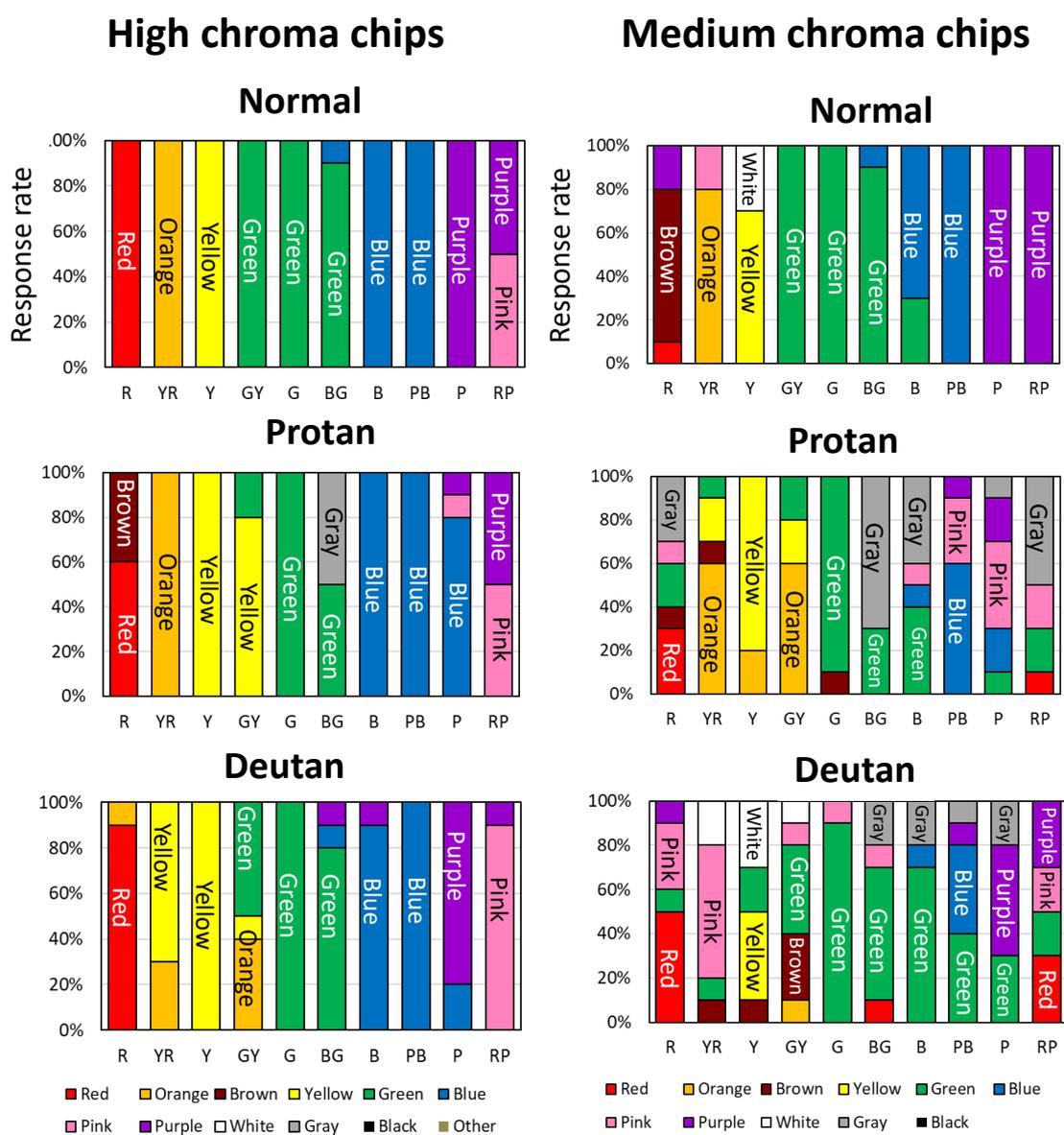


図 4-3: 制限 BCT 実験の結果

図 4-3 は制限 BCT 実験の結果である。左が高彩度,右が中彩度, 上から, Normal, Protan, Deutan の結果である。図中のグラフは, 各カラーカード刺激に対する選択された BCT を示している。5 人の観察者×2 回の繰り返し=10 回の結果を 100%として表している。横軸はカラーカードの各知覚刺激を示している。高彩度の結果において, CNO の結果は安定しており, 8 つのチップが 100%の一貫性と一致性を示している。CDO は Protan が, YR を橙, B を青と呼び, Protan と Deutan が Y を黄色, G を緑, PB を青, と呼び, それぞれ 100%の一貫性と再現性を示した。

中彩度は CNO の結果は, 多くの観測者が R を 茶色と命名した以外は, 安定している。CDO の結果には大きなばらつきがあり, 橙や灰色が Protan に多くある。緑やピンクが Deutan に多く見られる結果となった。

4. 4 解析

次に色名の回答の差が多い，中彩度の Protan と Deutan の結果を用いてカラーネーミングの結果について，解析をおこなった．解析の方法としてはカラーネーミングの際の色空間がわかれば，DI を用いて定量化して，議論ができると考えた．解析のステップとして，ある被験者において，色票 1 と色票 2 が同じ場合は距離 0，異なる場合は異なる色名間の相違度判定実験での認知的距離を利用して，ネーミングの際の色の距離を当てはめ，マトリックスを作り MDS をおこなうことで，カラーネーミングの際の色空間を想定する．これには，BCT11 色についての 2 色の色名に対する距離を把握する必要がある．そのため，先に示した色名実験では BCT の一部の色が含まれていないため，追加の色名実験をおこなった．

4. 4. 1 色名追加実験

色名追加実験では BCT の 11 色の距離がわかればよいが，Munsell10 色に対しても形が保たれているか確認するため，Munsell の基本 10 色を含んだ合計 15 色で，追加の色名の相違度判定実験をおこなった．具体的には，Munsell 基本色：赤，橙，黄，黄緑，緑，青緑，青，青紫，紫，赤紫 の 10 色．BCT は赤，橙，黄，緑，青，紫，白，黒，灰色，茶色，ピンク の 11 色である．そのため，Munsell10 色に，BCT の内重複しない，白，黒，灰色，茶色，ピンクの 5 色を加えた 15 色で色名実験をおこなった．被験者は，カラーネーミング実験を行った被験者の内，追加で 15 色の色名実験をおこなえた CNO 2 名，Protan 4 名，Deutan 3 名である．表 4-2 に被験者の色覚型判別試験の結果と，実施した色名実験とカラーネーミング実験との関係を示す．

表 4-2: 被験者と実施試験との関係

Obs.	Age	Color vision type	Anomaloscope	Panel D-15	Ishihara chrat	experiment		
			Matching range	Crossings pararell to protan line	% correct as an ideal normal trchiromat	ColorName10	ColorName15	ColorNaming
N10	22	N	30-50	0 (pass)	96%	○		
N11	22	N	40	0 (pass)	100%	○		
N12	24	N	40-50	0 (pass)	100%	○		
N13	25	N	40	0 (pass)	100%	○		
N14	22	N	40	0 (pass)	96%	○		
N15	21	N	40-50	0 (pass)	100%	○		
N16	23	N	40	0 (pass)††	100%	○		
N17	23	N	40	0 (pass)	100%	○		
N18	21	N	30-40	0 (pass)	100%			○
N20	22	N	40	0 (pass)	100%	○		○
N32	46	N	40	0 (pass)	100%	○	○	○
N33	44	N	40	0 (pass)	100%			○
N34	23	N	40	0 (pass)	100%			○

Obs.	Age	Color vision type	Anomaloscope	Panel D-15	Ishihara chrat	experiment		
			Matching range	Crossings pararell to protan line	% correct as an ideal protanope	ColorName10	ColorName15	ColorNaming
P3	38	PA	10-70 †	4.5	76%	○	○	○
P4	30	PA	0-70 †	4	64%	○		○
P5	39	P	0-73 †	2.5	52%	○		
P7	21	PA	0-70 †	0 (pass)	74%	○		
P8	23	PA	0-60 †	0 (pass)	32%	○		
P9	23	PA	0-70 †	4.5	52%	○		
P10	44	P	0-73 †	4	80%	○		
P11	37	P	0-73 †	4.5	64%	○	○	○
P13	30	P	0-73	4	4%	○	○	○
P14	21	P	0-73	5	76%	○	○	○
P15	39	P	0-73	4.5	60%	○		

Obs.	Age	Color vision type	Anomaloscope	Panel D-15	Ishihara chrat	experiment		
			Matching range	Crossings pararell to deutan line	% correct as an ideal deuteranope	ColorName10	ColorName15	ColorNaming
D7	34	D	0-73	5	68%	○	○	○
D8	24	D	0-73 †	6	76%	○		
D9	24	D	0-73	1	48%	○		
D10	24	DA	0-50 †	0 (pass)	82%	○		
D12	22	DA	0-60	6	62%	○		
D11	21	D	0-73	5.5	60%	○		
D13	20	D	0-73 †	0 (pass)	74%	○		
D14	31	D	0-73	4	70%	○		
D17	46	D	0-73	6	64%	○	○	○
D18	40	D	0-73	6	64%	○	○	○
D20	52	D	0-73	6	64%			○
D21	51	D	0-73	6	0%			○

† results with repetition

†† 2 transpositions between cap3 to cap8

得られた被験者の代表的な結果を図 4-4 に示す。上から Normal の N32, Protan の P14, Deutan の D17 の結果で、左が 2 章でおこなった 10 色の色名実験の結果、右が今回 15 色にして、追加で行った色名の実験結果である。

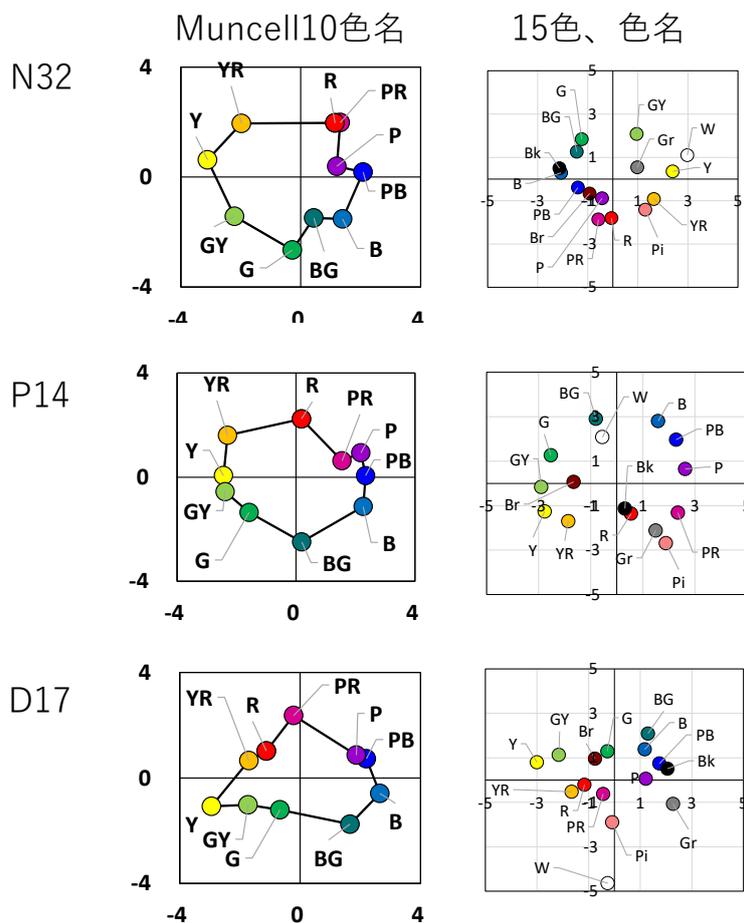


図 4-4: 10 色色名実験と、追加 15 色色名実験との比較

15 色名における MDS の結果が得られた。15 色名の結果に関しては 10 色名に比べて、5 色多く、特に、絶対的に大きな差である白と黒も含まれるため、追加 5 色の影響による従来の 10 色の関連性の低下が懸念された。そこで、同じ 10 色名からの 2 色、合計 45 対の評価結果について相違度評価値相関を調べた。すべての個人において $P < 0.001$ となり、各個人の R の値は優位に 0 と異なり、相関があるといえる結果となった。実施した 8 人の平均値は $R=0.809$ 、標準偏差 $=0.135$ 、最小の人でも $R=0.559$ となり、比較的強い相関であった。このため、15 色名の結果は、10 色名の結果をある程度

保持した色名空間表現であると言える。また、15色の内、Munsell色相環の元の10色を点でつないで得たDI値を基の10色の色名実験のDIと比較した結果が図4-5となる。異なる被験者間でのDI値に関する相関係数Rは0.59となり、正の相関を示す。

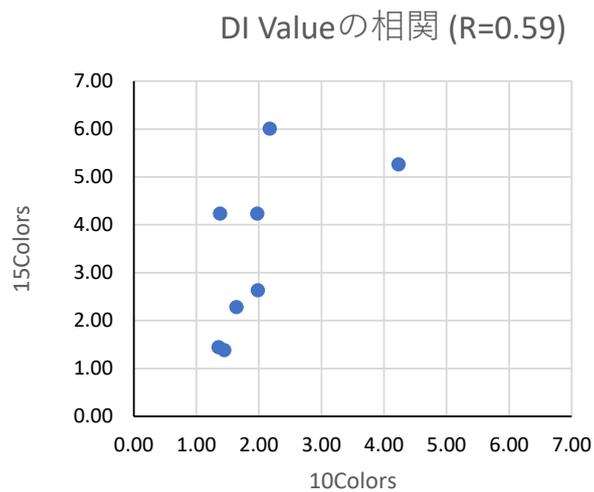


図 4-5:10 色色名実験と、15 色色名実験の DI 値の比較

4. 4. 2 カラーネーミング実験解析手順

解析は MDS を行いカラーネーミングの色空間を把握した。そのためのステップについて図 4-6 を用いて説明する。

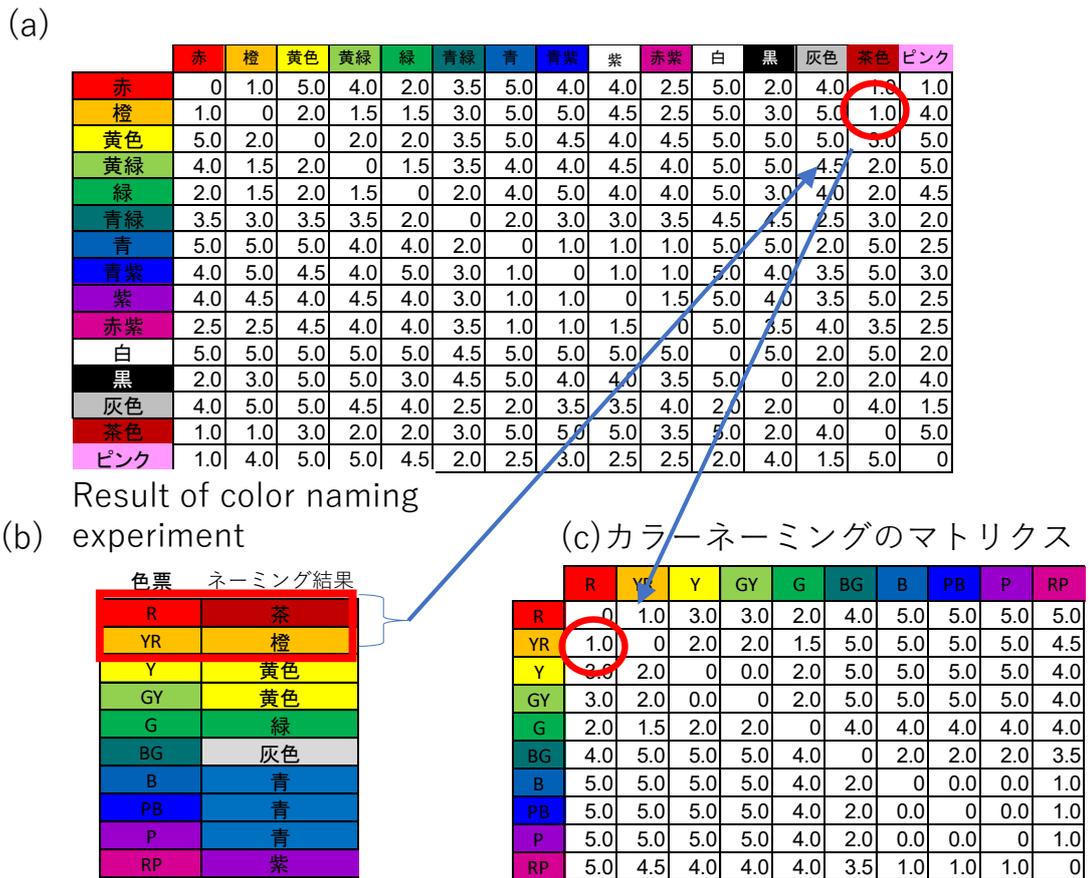


図 4-6: カラーネーミングの際の解析手順の説明図

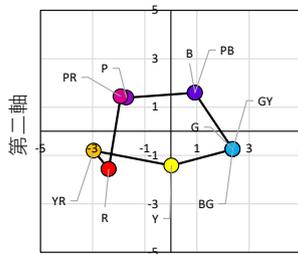
図は実際の試験の P3 の被験者の計算例である。図中 (a) は追加実験で行った色名実験の 5 段階評価値の、2 回の試験の平均値が書かれている。(b) は今回解析対象となるカラーネーミング実験の結果である。最終的に求めたいものは(c)のカラーネーミングのマトリクスである。例として、(c)の R vs. YR を埋める場合を考える。この場合、(b)によりカラーネーミング実験で被験者が選択した色を調べる。(b)のカラーネーミング試験の時に、“R”を見て、「茶色」、 “YR”を見て「橙」と答えているため、2 つの色の差は、被験者において、「茶色」と「橙」程度の差がある。茶色と橙の差は、(a)の表にある (赤○である部分) の 5 段階評価値で 1 程度の距離として名前同士の違いを認

識している。名前同士の距離感のデータベース情報をもって、(c)の赤と橙の差異度として1と転記していく。このように、カラーネーミング試験で行った、すべての色の組み合わせに対して、色名での差異データベースを利用して、数値で埋めていくことにより、(c)のマトリクスが完成する。この、(c)のマトリクスを用いて MDS を行い、カラーネーミング試験の際の色空間を得ることができる。

4. 4. 3 解析結果と考察

まず高彩度制限 BCT の MDS の解析結果を図示す。

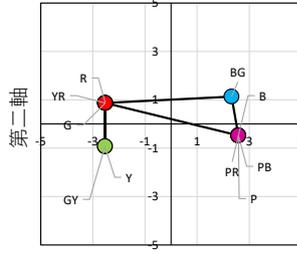
高彩度Normal



第一軸

BCT 高彩度 N20 第一,二軸

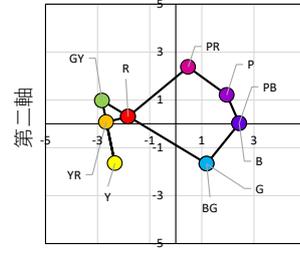
高彩度Protan



第一軸

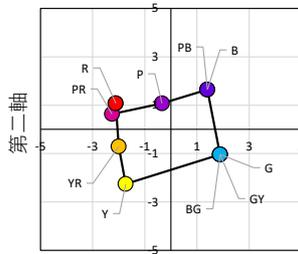
BCT 高彩度 P3 第一,二軸

高彩度Deutan



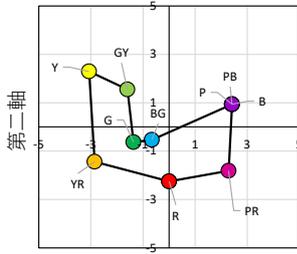
第一軸

BCT 高彩度 D7 第一,二軸



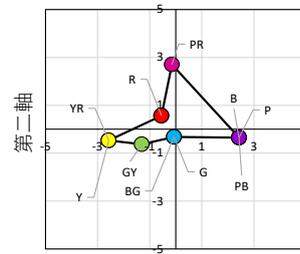
第一軸

BCT 高彩度 N32 第一,二軸



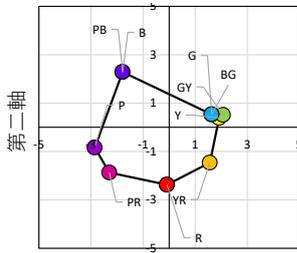
第一軸

BCT 高彩度 P11 第一,二軸



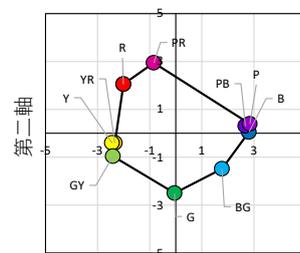
第一軸

BCT 高彩度 D17 第一,二軸



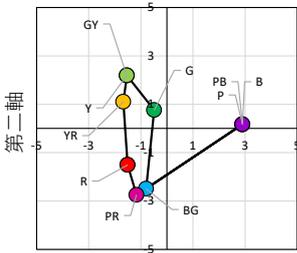
第一軸

BCT 高彩度 P13 第一,二軸



第一軸

BCT 高彩度 D18 第一,二軸



第一軸

BCT 高彩度 P14 第一,二軸

図 4-7: 高彩度色票に対するカラーネーミング

次に中彩度の結果について図 4-8 に示す。

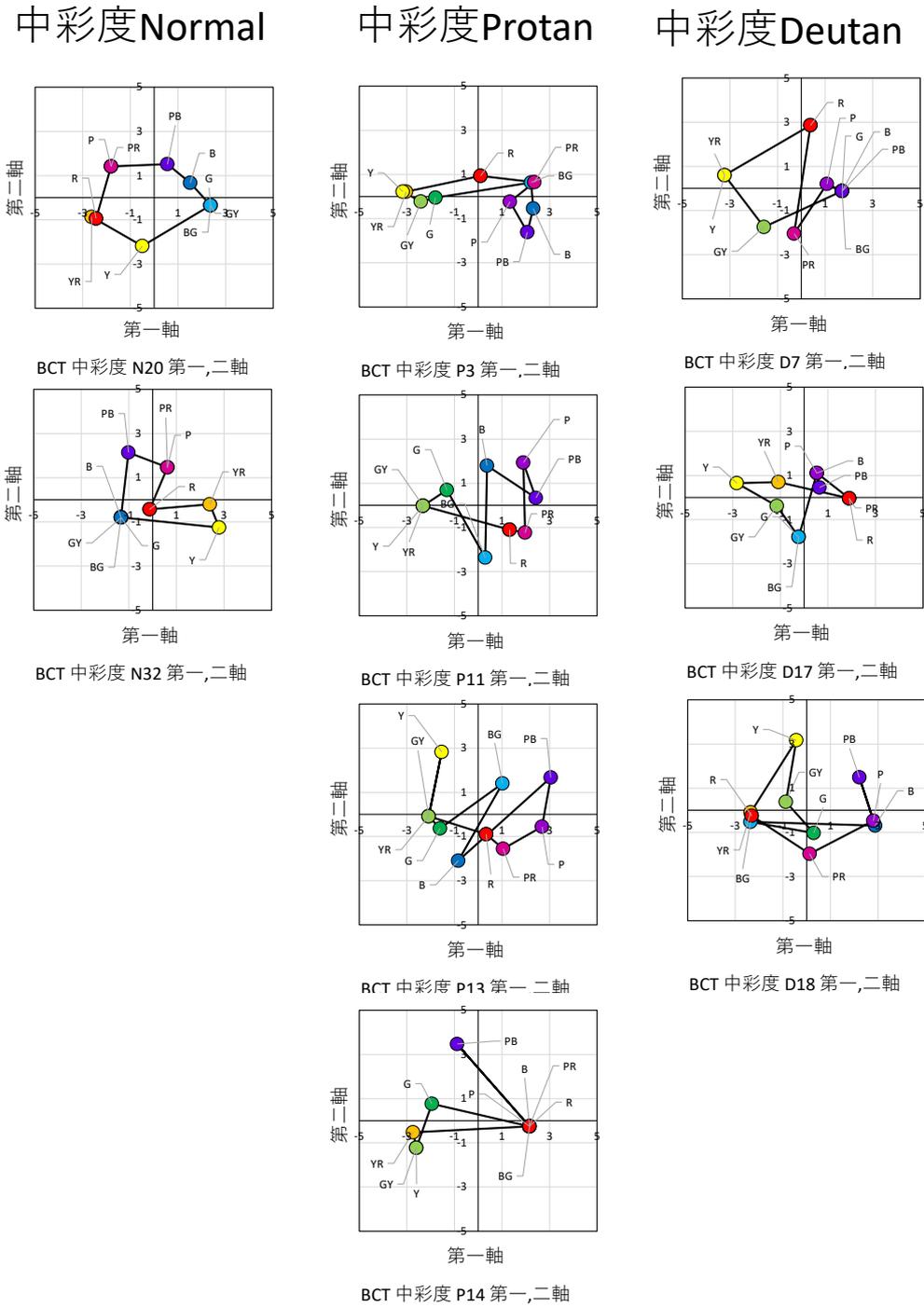


図 4-8: 中彩度色票に対するカラーネーミングの色空間

図 4-7, 4-8 について説明と考察を述べる. 図 4-7 は高彩度, 図 4-8 は中彩度の色票を用いた BCT 制限ネーミング実験の色空間を示す, 左から Normal 2 名, Protan 4 名 Deutan 3 名の個人のグラフである. まず図 4-7 の高彩度から見ると Normal の 2 名は, 円ではないが, Munsell 色相環に対応した空間の広がりがあることがわかる. Protan, 4 名, Deutan 3 名についても, 既出の色空間同様, 円形から, Y と PB を端点とした C-shape への変形の途中段階のような歪状態となっている. それに対し図 4-8 の中彩度は Normal の N20 は円形であるが, N32 の人においては歪が大きく, 他の Normal の色空間では見られない変形がみられる. また Protan, Deutan も概ね, Y, PB を端点とする歪であるが, Protan の被験者 P11, P13 などは, C-shape とはかけ離れ, 複数の線の交差があり, Munsell 色相環を基にした色空間の広がりとは異なる, 複雑な歪を有する布置を示した.

歪度合いという観点に着目して, 高彩度と中彩度を定量的に比較するため, 各 DI 値を取得した. 色知覚実験, 色名実験の比較と合わせて表 4-3 に示す.

表 4-3: カラーネーミング試験の色空間の DI

Obs. No.	Color Card High chroma	Color Nmaing High chroma	Color Card Medium chroma	Color Nmaing Medium chroma	Color Name 10Colors
N20	1.36	2.16	1.52	1.65	1.37
N32	1.41	1.81	1.24	3.45	1.35
P3	7.36	5.50	6.82	3.35	2.17
P11	15.44	3.52	5.66	5.63	1.97
P13	-	1.71	-	5.37	8.18
P14	5.92	14.58	5.33	2.96	1.44
D7	6.44	2.36	-	2.10	1.38
D17	4.96	3.59	9.73	2.99	1.98
D18	9.93	1.34	9.92	3.44	4.23

また, 高彩度と中彩度のカラーネーミングの結果の差を図 4-9 に示す. 図 4-9 を見ると分かる通り, 多くの人で, 中彩度のカラーネーミングの DI 値が高く, 色空間が歪んでいることがわかる.

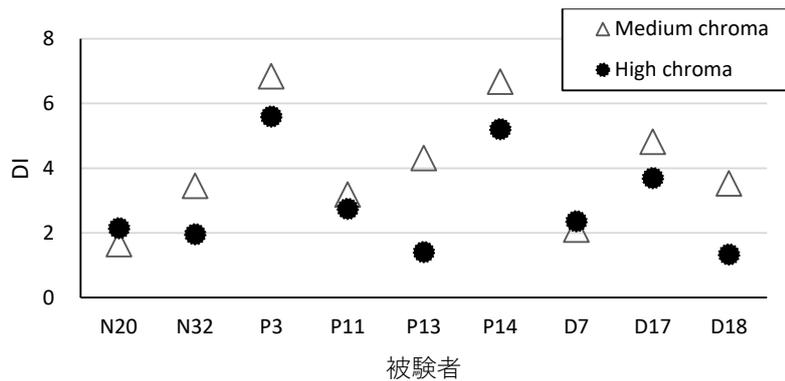


図 4-9: カラーネーミングの高彩度と中彩度 DI の比較

次に、個人ごとの色知覚と色名の DI と相対的に比較した。結果を図 4-10 に示す。

図中左が高彩度、右が中彩度である。横軸は、左から色知覚 (Color Card), カラーネーミング, 色名 (Color Name) と並んでいる。色名 (Color Name) の結果はどちらも同じプロットを用いている, また Normal, Protan, Deutan と分類がわかるように色分けをして示して。概ね DI 値は色知覚が一番大きく, 色空間が歪んでいることを意味していて, 色名が一番歪んでいない結果となった。1 名のみ, D18 においては高彩度でも中彩度でも, ネーミングよりも色名の色空間のほうが歪んでいる結果となった。また, この結果から特筆すべきは, Color Naming の結果に関して, Protan のほうが Deutan よりも DI が全体的に高いように見受けられる。ただし, Protan4 名, Deutan3 名の結果 (さらに, 一部の試験が抜けている人はグラフからは省いている) のため,

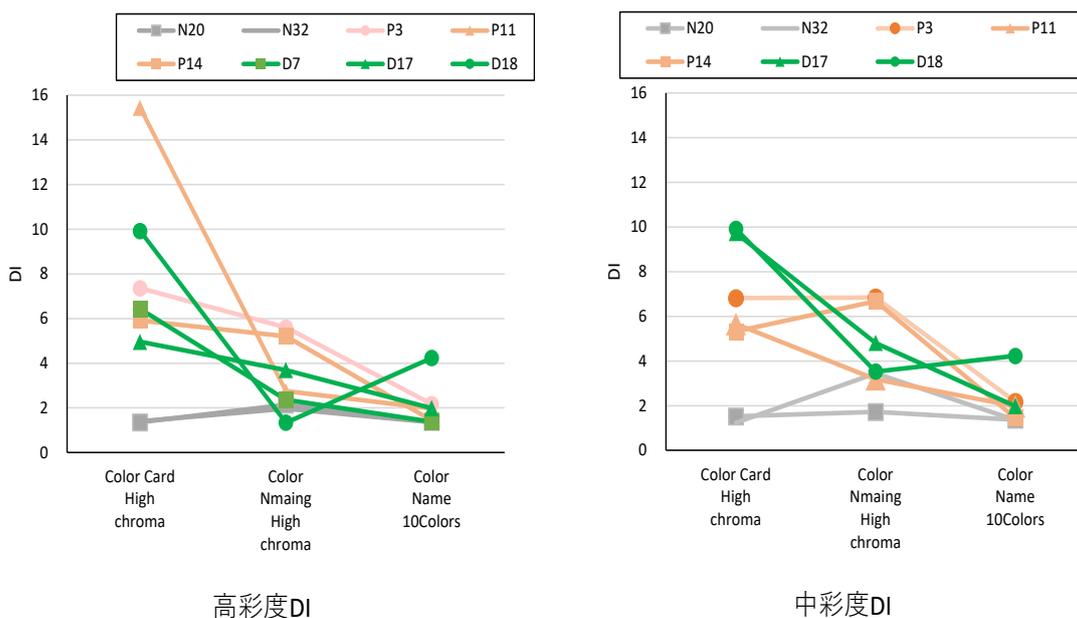


図 4-10: 色知覚, カラーネーミング, 色名の各実験の色空間の個人の DI

そのため統計的解析には至らないが、これについては今後被験者を増して明確にしていくことが今後の課題である。

被験者の母数は異なるが、第2章で行った色知覚実験と色名実験の結果とカラーネーミングの結果を対比し、平均から求めた色空間とDI値について図4-11に示す。

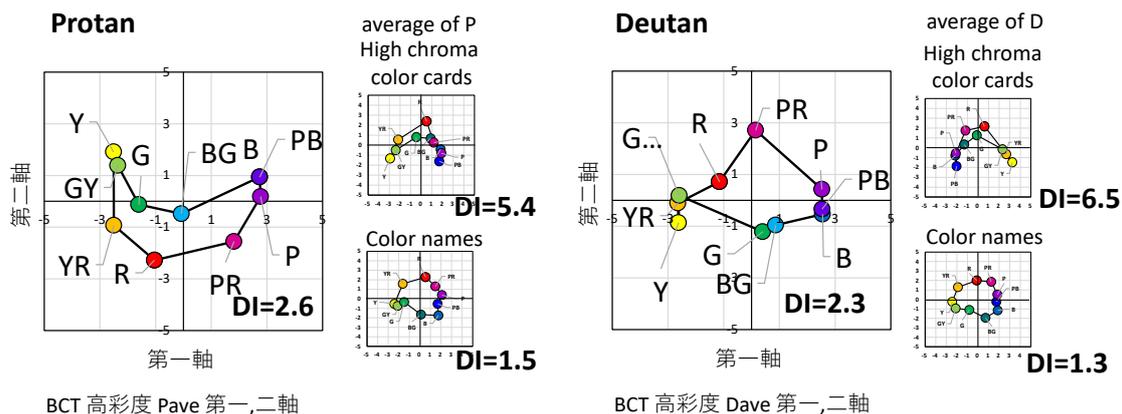


図 4-11: カラーネーミングの平均グラフと DI

図 4-11 は左に Protan, 右に Deutan で各大きいグラフがカラーネーミングの色空間のグラフで, その隣にある小さいグラフは上が色知覚 (Color Card), 下が色名 (Color Name) である。これらに関しても個人の傾向から観察されるような傾向と同じく, カラーネーミングの DI は色知覚より小さく, 色名より大きい傾向が得られた。

4.6 第4章のまとめ

Protan と Deutan のカラーネーミングにおける DI は 色名による色空間の DI よりも大きく、知覚の色空間の DI よりも小さくなった。

CDO は、知覚に基づく色空間と、認知に基づく色名空間を統合して最終的なネーミングを決定することが示唆される。ネーミング色空間が知覚の色空間より歪が減少した空間となる。この広がり、赤や緑のネーミングを可能にしているものと考えられる。個人の DI で見るとこの色空間の歪の減少割合に個人差があり定量的に明らかになった。この個人差の原因を突き止めることが、ネーミングメカニズム解明の次の課題である。

また、今回、Protan4名,Deutan3名と被験者が少ないが、Protan と Deutan でのカラーネーミングの色空間の広がり、に差があることが想定される。これは元来の Protan と Deutan の間で、ネーミングの際の色空間の広がり、が異なることを意味している可能性がある。ここは被検者を増やして、正確性を挙げていくのが今後の課題である。

カラーネーミング色空間の広がり、の個人毎や色覚型毎に差の主要因として、錐体の分光特性の差が主要因の 1 つであると想像されるため、こちら、生体モデルを基にした提案モデルの検証を行い、さらなる副要因の仮説を加え、ネーミング空間、ネーミングの実際の挙動の関係を明らかにしていくことが、今後の課題である。

第5章 まとめ

5.1 まとめ

目的：本研究では赤緑色覚異常の方々の色の見え方の個人差，各分類に属する人の個人差の分布を明らかにして，個人がどのように色をとらえ，色の名前を利用しているかを脳内色空間という空間の定量化により解析し関係を理解することを目的とした。

結果：次の①～③を得ることができた。

①CNO と CDO の個人毎の知覚的色空間と，色名による脳内色空間を相違度評価実験で測定し，MDSを用いて2次元グラフ化し，DIを用いて解析した。

解析により，次のことが分かった。

- ・色知覚によるCDOの内部色表現は，ほぼC-shapeで個人差が大きい。
- ・一方，色名のみに基づくものは，CNOと同様CDOも円形になり個人差は小さい。

②色覚型を模擬した色空間推定モデルに，非線形変換を導入した。

この導入により，実験結果に対して高い相関で，個人の特性を定量化することができるようになったことを明らかにした。

③カラーネーミング実験を行い，カラーネーミングにおける色空間について，色名実験の結果を利用し布置することができた。その結果，DIを調べ，個人と色覚型毎の，知覚的色空間、色名色空間のDIと定量比較することができた。これにより次のことが分かった。

・色弱者におけるカラーネーミングにおける色空間は，知覚的色空間より歪が減少し，色名空間と同じ円形に近くなっている。この結果より，色弱者はネーミングの際に色名の知識を利用して，色空間を拡張して，ネーミングを行っていることが示唆される。

5.2 今後の展望

今回の実験で，一般色覚，色弱者の色空間のばらつきと，そのばらつきに応じた個々人のモデルのフィッティングをおこなうことができた。しかし，このモデルのフィッティングも完全に一致してはいない。明らかな違いとしては，今回のモデルに採用した錐体分光特性は，個人の目の実際の錐体分光特性を測定したものでない。さらに眼内吸収スペクトルも想定値である。さらに，非線形変換にも，色相ごとの飽和度の差などが考えられる。これらの残りの差分を生じる要因を明らかにして，フィッティングの精度を上げることと，また，簡単に個人の色覚特性のパラメータを取得する

手段を見つけることは今後も進める必要があると考えている。これらを進めることにより、そのパラメータを用いた、スマートフォンや、タブレットデバイスなどのパーソナルディスプレイに対し、容易に個人に適したカスタマイズが提供できるようになっていくと考えられる。

色知覚に関しては、知覚した色に対して色名を付与することで、色空間の歪度合いが緩和していることを考えると、色名の学習における、色知覚以外の手掛かりの収集に、色弱者が赤や緑を見誤らない手掛かりが含まれると思われる。そのため、年齢に応じた色の学習過程における、カラーネーミングの正答率の研究は、色名学習に手掛かりがあることの裏付けとなるので研究のする意義があると考えられる。また、色名学習における赤や緑の手掛かりを、一般のデザインへ付与することで、より効果的なカラーユニバーサルデザインへと発展させることが期待できる。

謝辞

本論文をまとめるにあたり、指導教員として多大なるご指導、ご鞭撻と共にご支援を賜りました、阿山みよし名誉教授、石川智治准教授には、謹んで深く感謝を申し上げます。お忙しい中、何度ものミーティングにお時間を割いていただき、色の認知にかかわる基礎的な考え方から、研究内容、研究発表、本論文作成に至るあらゆる面でご指導いただきました。誠にありがとうございました。また、国際高等専門学校 大塚作一教授、鹿児島大学 比良祥子様には、研究と論文執筆にあたり、的確なご指導、激励承り、誠にありがとうございました。心より厚く御礼申し上げます。また、千葉大学 矢口博久教授にはシミュレーションに関してご助言をいただきました。心より厚く御礼申し上げます。

本研究に際し、カラーユニバーサルデザイン機構の皆様のご協力に感謝の意を表します。

また、本研究の遂行に当たり、同研究班で協力してくださった金成 宏太様、三上寛人様、田中香様、他、阿山研究室の皆様へ感謝の意を表します。

最後に、社会人でありながら、仕事以外の多くの時間を研究に充てることを許し、応援してくれた、両親、家族に感謝致します。

参考文献

- [1] 色覚異常-色盲に対する誤解をなくすために, 深見 嘉一郎著, 金原出版; 改訂第4版 2003年11月1日発行, pp1-123,
- [2] 「色のふしぎ」と不思議な社会, 川端裕人著, 筑摩書房 第4版 2020年10月24日発行, pp1-348
- [3] CIE 240:2020. *Enhancement of images for colour-deficient observers*. Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage; 2020.
- [4] 市川一夫 (2007年9月6日). “色覚関連用語について”. *日本医学会医学用語辞典*. 日本医学会.
- [5] Neitz M, Neitz J. Molecular genetics of color vision and color vision defects. *Arch Ophthalmol*. 2000;118(5):691-700. doi:10. 1001/archopht. 118. 5. 691
- [6] Neitz M, Patterson SS, Neitz J. Photopigment genes, cones, and color update: Disrupting the splicing code causes a diverse array of vision disorders. *Curr Opin Behav Sci*. 2019;30:60-66. doi:10. 1016/j. cobeha. 2019. 05. 004
- [7] Neitz J, Neitz M, Kainz PM. Visual pigment gene structure and the severity of color vision defects. *Science*. 1996;274(5288):801-804. doi:10. 1126/science. 274. 5288. 801
- [8] Shepard RN, Cooper LA. Representation of colors in the blind, color-blind, and normally sighted. *Psychol Sci*. 1992;3(2):97-104. doi:10. 1111/j. 1467-9280. 1992. tb00006.
- [9] Jameson D, Hurvich L.M 1978. Dichromatic color language: “Reds” and “Greens” don’t look alike but their colors do. *Sensory Processes 2*: 146-155.
- [10] Pitt FHG. The nature of normal trichromatic and dichromatic vision. *Proc R Soc Lond*. 1944;B132:101-117. doi:10. 1098/rspb. 1944. 0006
- [11] Paramei GV. Color discrimination across four life decades assessed by the Cambridge Colour Test. *J Opt Soc Am A*. 2012;29(2):A290-A297. doi:10. 1364/JOSAA. 29. 00A290
- [12] Rodriguez-Carmona M, O’Neill-Biba M, Barbur JL. Assessing the severity of color vision loss with implications for aviation and other occupational environments. *Aviat Space Environ Med*. 2012;83(1):19-29. doi:10. 3357/ASEM. 3111. 2012

- [13]Shinomori K, Panorgias A, Werner JS. Discrimination thresholds of normal and anomalous trichromats: Model of senescent changes in ocular media density on the Cambridge Colour Test. *J Opt Soc Am A*. 2016;33(3):A65-A76.
doi:10.1364/JOSAA.33.000A65
- [14]Paramei GV. Color space of normally sighted and color-deficient observer reconstructed from color naming. *Psychological Science*. 1996;7(5): 311-317.
doi:10.1111/j.1467-9280.1996.tb00380.x
- [15]Paramei GV, Bimler DL, Cavonius CR. Color-vision variations represented in an individual difference vector chart. *Color Res Appl*. 2000;26(S1):230-234.
doi:10.1002/1520-6378(2001)26:1+::AID-COL49>3.0.CO;2-Z
- [16]Bonnardel V. Color naming and categorization in inherited color vision deficiencies. *Vis Neurosci*. 2006;23(3-4):637-643. doi:10.1017/S0952523806233558
- [17]Lillo J, Moreira H, Álvaro L, Davies I. Use of basic color terms by red–green dichromats: 1. General description. *Color Res Appl*. 2014;39(4):360-371.
doi:10.1002/col.21803
- [18]Oliveira MM. Towards more accessible visualizations for color-vision-deficient individuals. *Comput Sci Eng*. 2013;15(5):80-87. doi: 10.1109/MCSE.2013.113.
- [19]Waldin N, Bernhard M, Rautek P, Viola I. Personalized 2D color maps. *Comput Graph*. 2016;59:143-150. doi:10.1016/j.cag.2016.06.004
- [20]Okudera S, Sagawa K, Nakajima Y, Ohba N, Ashizawa S. Psychological hue circle of blind people and development of a tactile color tag for clothes. *Proc AIC 2015*; 761-766.
- [21]Sturges J, Whitfield TWA. Locating basic colours in the Munsell space. *Color Res Appl*. 1995;20(6):364-376.
- [22]Berlin B, Kay P. Basic color terms: *The universality and evolution*. Berkeley, CA: University of California Press. ;1969.
- [23]Jägle H, Pirzer M, Sharpe LT. The Nagel anomaloscope: its calibration and recommendations for diagnosis and research. *Graefe's Arch Clin Exp Ophthalmol* 2005;243:26-32. doi:10.1007/s00417-004-0893-z
- [24]Yaguchi H, Luo 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. doi:10.1364/JOSAA.35.00B278

- [25] CIE 170-1:2006. *Fundamental chromaticity diagram with physiological axes-part 1*. Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage; 2006.
- [26] CIE 170-2:2015. *Fundamental chromaticity diagram with physiological axes-part 2. Spectral luminous efficiency functions and chromaticity diagrams*. Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage; 2015.
- [27] Wyszecki G, Stiles WS. *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae*, 2nd ed. John Wiley & Sons Inc. , New York. 1982:591-604.
- [28] Merbs SL, Nathans J. Absorption spectra of human cone pigments. *Nature* 1992;356:433-435. doi:10. 1038/356433a0
- [29] Berlin. B. • & Kay. P. (1969). Basic color terms. Berkeley: University of California Press.
- [30] Boynton RM, Olson CX. Salience of chromatic basic color terms confirmed by three measures. *Vision Research* 1990;30(9):1311-1317. doi:10.1016/0042-6989(90)90005-6

付録 A

表_付録 A:個人中彩度色知覚色空間の差異を示すパラメータ群

Observer		Experiment	Simulation					Correlation coefficient	
		Relative distance between R and G	Estimated wavelength separation	Weighting coefficients of luminance, r/g, and y/b (W _{Lumi} =0 for all obs.)		Constants in Eq.13			
No	Type			$\Delta\lambda$	W _{r/g}	W _{y/b}	α	β	R
N10	N	93.1%	18.5	3.69	1	6.29	8.12	0.870	0.87
N11	N	72.8%	14.5	2.66	1	5.82	9.31	0.863	
N12	N	84.8%	16.8	2.85	1	6.10	9.56	0.887	
N13	N	86.1%	17.1	3.51	1	5.66	7.42	0.851	
N14	N	65.2%	12.9	-	-	-	-	-	
N15	N	92.1%	18.3	2.89	1	6.09	7.45	0.893	
N16	N	86.9%	17.3	4.63	1	5.50	7.93	0.830	
N17	N	96.0%	19.1	3.32	1	6.57	10.22	0.892	
N20	N	81.3%	16.2	4.45	1	4.58	5.58	0.809	
N32	N	93.7%	18.6	3.73	1	5.22	6.70	0.900	
P3	PA	42.2%	8.2	0.74	1	5.50	10.44	0.934	0.92
P4	PA	20.8%	4.0	0.99	1	5.56	17.20	0.885	
P5	P	21.7%	4.2	1.70	1	5.53	7.72	0.917	
P7	PA	61.5%	12.0	2.04	1	4.81	7.94	0.857	
P8	PA	95.9%	19.0	-	-	-	-	-	
P9	PA	26.4%	5.1	0.66	1	4.31	7.30	0.932	
P10	P	52.1%	10.2	0.99	1	6.23	21.56	0.900	
P11	P	11.3%	2.2	1.37	1	5.16	11.55	0.953	
P14	P	15.1%	2.9	1.50	1	4.63	9.80	0.932	
P15	P	22.4%	4.3	0.95	1	5.62	15.51	0.948	
D7	D	32.9%	6.7	-	-	-	-	-	0.93
D8	D	8.8%	1.8	0.00	1	4.40	10.86	0.934	
D9	D	41.5%	8.4	0.51	1	5.70	27.03	0.926	
D10	DA	89.7%	17.9	2.14	1	4.75	6.58	0.883	
D11	D	39.9%	8.1	0.48	1	4.78	10.87	0.934	
D12	DA	20.3%	4.1	0.79	1	4.70	7.65	0.938	
D13	D	96.4%	19.2	-	-	-	-	-	
D14	D	10.1%	2.1	-	-	-	-	-	
D17	D	10.9%	2.2	1.20	1	6.07	14.69	0.935	
D18	D	7.9%	1.6	0.91	1	5.72	16.52	0.933	

- は中彩度試験未実施者