

照明環境とカテゴリカル色認識

—基礎から応用へ—

平成13年3月

社団法人 照 明 学 会

種々の照明環境における色の認識特性研究調査委員会 報告書

照明環境とカテゴリカル色認識 —基礎から応用へ—

照明学会「種々の照明環境における色の認識特性研究調査委員会」報告書

目次

第1章 序論

- 1-1 委員会の目的 1
- 1-2 本委員会の構成 1
- 1-3 活動概況 2
- 1-4 研究調査報告書の概要 3

第2章 カテゴリカル色認識の基礎研究

- 2-1 文化人類学的研究 4
- 2-2 心理物理学的研究 5
- 2-3 生理学的研究 6
- 2-4 計算論的研究 7

第3章 照明環境に応じたカテゴリカル色認識特性

- 3-1 カテゴリカル色認識特性に関する研究まとめ 10
- 3-2 照度レベルに応じた色の同定特性の測定 14
- 3-3 カテゴリカル色知覚の照度及び視野特性 21
- 3-4 光源の分光分布 27
- 3-5 観察者の年齢と照度の影響 33

第4章 カテゴリカル色認識のモデル

- 4-1 CIECAM97sにおけるカテゴリカル色知覚領域 40
- 4-2 基本色のカテゴリカル認識モデル 47
- 4-3 カテゴリカルカラーネーミングと
反対色型色相評価結果の岡嶋モデルによる解析 57

第5章 カテゴリカル色認識の照明・色彩工学への応用

- 5-1 カテゴリカル色認識と高効率ランプの開発 65
- 5-2 カテゴリカルカラーレンダリング 77
- 5-3 生活環境とカテゴリカル色認識 84

第1章 序論

1.1 委員会の目的

今日、生活環境の様々な場面において色が活用されている。例えば、標識や分類の符号として用いられる色、映像メディアにおける色表現などである。これらの色を適正に活用することは、生活の質を高め、より安全で豊かな環境を実現するために重要な要素となるだろう。そして、色の見え方が照明と密接に関係することを考えれば、この問題はまさに照明環境の課題と言ってもよい。

ところで色の見え方は色空間上で連続的に変化する。一方、色空間上で適当な間隔において色を選択した場合、それらの色は、量的な違いのみならず、明確に区別可能なカテゴリーに属する色として認識される。赤、黄、緑、青などの色名で表わされる色の認識のされ方はその典型例である。つまり色の見えは連続的に変化する性質と不連続的に区分される性質を合わせもつと言える。本報告書では、区別可能なカテゴリーに属するものとして色を認識することを、カテゴリカル色認識と呼ぶことにする。標識や分類の符号として用いられる色コードや映像メディアによる情報伝達といった色の活用を考えると、それらが何色として認識されるか、すなわちカテゴリカル色認識の特性が重要な意味をもつ。適正に色を活用し、質の高い生活環境を実現するためには、照明環境に応じたカテゴリカル色認識の特性を十分理解することが必要となる。

本研究調査委員会（平成10年4月～平成12年3月）では、照明環境とカテゴリカル色認識の特性について、既往研究の調査と測定データの検討を行い、その基礎から応用に至る最新の知見を体系化することを目指して活動を進めてきた。さらに、カテゴリカル色認識の特性を照明工学や画像工学へ応用した研究について議論し、将来的な応用の可能性を展望した。

1.2 本委員会の構成

本委員会の構成は次の通りであった。

委員長	石田泰一郎	(京都大学)
幹事	清水正則	(松下電器産業(株))
委員	芦澤昌子	(青葉学園短期大学)
	阿山みよし	(宇都宮大学)
	岡嶋克典	(防衛大学校)
	栗木一郎	(東京工業大学→東京大学)
	小林信治	((財)日本色彩研究所)
	阪口敏彦	(松下電工(株))
	佐川 賢	(生命工学工業技術研究所)
	矢口博久	(千葉大学)
	小島浩之	(東芝ライテック(株)) 平成10年度

1.3 活動概況

本委員会は平成10年度に3回、平成11年度に3回の委員会を開き、平成11年4月には本委員会委員が中心となって公開研究会「照明環境とカテゴリカル色知覚—基礎から応用へ」が開催された。各委員会での主な検討内容は以下の通りである。

第1回委員会（平成10年7月3日）

委員会の研究調査内容の趣旨説明と討議

研究紹介：照度レベルと色の同定について（石田）

第2回委員会（平成10年10月2日）

委員会の研究調査内容の討議

カテゴリカル色認識の文献調査

研究紹介：カテゴリカル色認識のモデル（岡嶋）

研究紹介：カテゴリカル色認識と高効率光源（清水）

第3回委員会（平成11年1月29日）

公開研究会の内容討議

研究紹介：CIECAM97sとカテゴリカル色領域（矢口）

研究紹介：照度レベルに応じた色同定の測定（石田）

公開研究会（平成11年4月16日）

「照明環境とカテゴリカル色知覚—基礎から応用へ」

（主催：照明学会視覚専門部会）

第4回委員会（平成11年5月28日）

東京工業大学総合理工学研究科にて開催

研究紹介：色分類と基本色カテゴリー（東工大、鯉田）

研究紹介：照度レベルに応じた周辺視野のカテゴリカル色知覚（東工大、瀬川）

カテゴリカル色認識のデータ整理の問題点を討議

東工大、内川研究室の実験設備を見学、意見交換

第5回委員会（平成11年9月14日）

研究紹介：照度に応じた色分類の加齢効果（佐川）

カテゴリカル色認識研究の文献紹介と討議

委員会報告書の構成について検討

第6回委員会（平成11年1月14日）

研究紹介：カテゴリカルカラーネーミングと反対色型色相評価結果の岡嶋モデルによる分析（阿山）

報告書内容について討議

1.4 研究調査報告書の概要

本委員会の研究調査報告書は以下の各章より構成される。その内容は委員会での議論に基づいて、カテゴリカル色認識の基礎的な理解から始まり、照明環境や観察条件に応じた測定結果の検討、カテゴリカル色認識の理論的な分析、さらにカテゴリカル色認識の特性の応用とその将来展望についてまとめたものである。

第1章「カテゴリカル色認識の基礎研究」では、Berlin&Kayによって提唱された基本色名（Basic color terms）に関する文化人類学的研究、心理学的研究、生理学的研究、さらに計算論的研究を概観し、カテゴリカル色認識とはどのようなものであるのか解説した。

第2章「照明環境とカテゴリカル色認識特性の研究」では、カテゴリカル色認識の特性を測定した研究を調査し、測定方法や観察条件などをまとめた。さらに、照度レベル、視野位置、光源の分光分布、観察者の年齢などに応じたカテゴリカル色認識の最新の研究を紹介した。

第3章「カテゴリカル色認識のモデル」では、カテゴリカル色認識の理論的な分析の側面を検討した。具体的には、最新の色の見えモデルである CIECAM97s の色空間上でカテゴリカル色認識の領域を評価した研究、反対色応答量からカテゴリカル色認識を導き出す計算モデルを開発した研究を紹介した。

第4章「カテゴリカル色認識の照明・色彩工学への応用」では、カテゴリカル色認識を光源の開発や色彩工学に応用した研究の紹介と将来の展望を述べている。交通照明などへの応用が期待されるカテゴリカル色認識を維持する高効率ランプの開発、色のカテゴリーを照明の演色性の評価基準としたカテゴリカルカラーレンダリングなどについての研究を紹介した。また、生活環境における色の活用についての問題点にも触れている。

1.5 まとめ

本委員会は色を専門とする委員の参加を得て、毎回活発な意見交換が行われた。本委員会のテーマに合致した研究に自ら取り組んでいる委員も多く、本委員会の報告書には既往研究の調査結果だけではなく、最新の研究によって得られた測定結果も収められている。これらは基礎研究のみならず、応用的な用途においても有益なデータとなるであろう。さらに将来的にはこのようなデータを統合し、照明環境に応じたカテゴリカル色認識特性のデータベースの構築やモデルの開発が望まれる。さらに、色を連続量としてではなく、離散的な性質をもつものとして捉えるカテゴリカル色認識の考え方は、照明工学や色彩工学に新しい展開をもたらすことが期待される。本報告書がそのための足がかりとなれば幸いである。

(石田泰一郎)

第2章 カテゴリカル色認識の基礎研究

2.1 文化人類学的研究

「基本色名 (Basic color terms)」という概念を明確に定義し、色名分化の過程を定量的に示しただけでなく、文化人類学的な研究調査結果から、人種による基本色名の数の違いを文化や技術の発達の場合と関連づけるという、大胆な仮説を提唱したのが Berlin & Kay (以後 B&K と記す) である¹⁾。彼らは、次の4つの性質を有するものを「基本色名」と定義すべきであると提案した。

- (1) 一語 (monolexemic) で表わすことができること。ここでいう一語とは、その語の一部だけではその語を意味的に連想できない語のことをいう。(例えば、"green" の一部 ("gr", "gree" etc.) では意味的に色名とはなりえない。したがって、"green" は一語の色名といえる。しかし、"yellow-green" は "yellow" という色を部分的に含むので、基本色名とはいえない。)
- (2) その色名の語義が、他の色名の語義に含まれないこと。(例えば、scarlet (緋色) は「燃えるような赤」を意味し、red に含まれる。したがって、基本色名とはいえない。)
- (3) 特定の物体の色名としてしか使えない一般性のない色名ではないこと。(例えば、通常 "blond" は髪の毛の色名としてしか使われないので、基本色名ではない。)
- (4) 心理学的に重要 (salient) な語。すなわち、色名を列挙させると最初の方で出てくる傾向があり、人に依らず、状況に依らず、安定して参照され、すべての人の言動において発せられる一般的な語であること。

また、彼らは様々な人種における色名調査の研究結果から、主に次の3つの結論を導き出した。

- (i) 人類にとって普遍的な11の基本知覚色カテゴリーが存在する。それは、11あるいはそれ以下の基本色名として、如何なる言語においても心理物理学的な指示語を与える。
- (ii) 言語の歴史において、知覚カテゴリーの基本色名に対する記号化 (encode) は、ある決まった順序に従って発展し、基本色名が増加する。その順序には2通りあり、
white, black => red => green => yellow => blue => brown => purple, pink, orange, gray
white, black => red => yellow => green => blue => brown => purple, pink, orange, gray

のいずれかである（2つの違いは green と yellow の順序が異なるだけである）。矢印は発展の方向を示している。すなわち、例えば green に対応する基本色名があるのに red に対応する基本色名がない言語は存在しないこと等を意味している。

- (iii) 基本色名の時間的な発展順序は、一種の進化論とも言える。すなわち、比較的単純な文化と技術 (simple cultures and simple technologies) を有する社会では基本色名が少なく、複雑な文化と技術 (complex cultures and complex technologies) を有する社会では多くの基本色名を有する傾向が見られる。

(ii) の順序について、もう少し詳しく述べておこう。最初は明るさの違いを表す white & black のみという段階で、これを Stage I とする。次に black に対して red が暗い色のバリエーションとして登場したのが Stage II とする。次に white と black の間の色である red が hue 方向に green または yellow のいずれかに分岐したのが Stage III とする (green があるのを Stage IIIa、yellow があるのを Stage IIIb と区別する場合もある)。さらに、green と yellow が両方加わった段階を Stage IV とし、blue が加わって Stage V とする。そして、さらに brown が加わって7色の基本色名を有する段階を Stage VI とする。このような発展段階は、最終的に11の基本色名を有する Stage VII まで存在する。しかしながら、B&K 自身、11の基本色名の知覚的重要性について物理学的及び生理学的な説明も、その発展順序の満足できる説明も今のところ存在しないとも述べている。

B&K のこの理論に対して、反論も数多く提出されている²⁾が、代表的な一例をここに紹介しておく。パプアニューギニアの狩猟採集民 Berinmo 族は、色に関する基本単語を5つ持つが、B&K の基本色理論では説明できないことも示されている³⁾。すなわち、彼らは青と緑は区別できないが、英語圏の人が区別できない黄色を区別する (nol & wor) ことが報告されている。また、2つの集団とも、言語で区別できない色区分を学習することはできるが、言語で規定されている方がうまく区別できることから、言語が色の知覚、すなわち色のカテゴリー化に影響を与えている可能性を示している。これは、2.3節で述べる色のカテゴリー化を行うメカニズムが、純粋に遺伝子レベルで規定されるのではなく、言語によって変調（影響）を受ける可能性を示唆しているという点で、重要な知見といえる。

2. 2 心理物理学的研究

B&K が提唱した11の基本色の重要性を、Boynton のグループが心理物理学的手法を用いた一連の実験で示した⁴⁾⁻⁸⁾。Boynton&Olson は、OSA 色票を用いて米国人の11基本色の領域を求め⁴⁾、Uchikawa&Boynton は日本人の被験者でも米国人とほぼ同じ11の基本色応答が得られることを示すとともに、11基本色に対する応答時間が短く、一致度や

安定度が高いことを示した⁵⁾。また、11の基本色応答は、実験方法に依らず安定して得られることも確認されている⁶⁾⁷⁾。また、基本色に対応したカテゴリー単位で色の記憶がなされているとの報告もある⁸⁾⁹⁾。

マンセル表色系においても、基本色の領域が求められており⁹⁾、基本色の応答は一致度が高く応答速度も小さいことも示されている¹⁰⁾。また、色票だけでなく、CRTディスプレイを用いても基本色の応答やその領域が測定され¹¹⁾¹²⁾、色弁別における基本色の重要性も示唆されている¹³⁾。ところで、Brownは周辺光がないとOrangeに見える。これは、周辺光によって色の見えのモードが変化することを意味しており、基本色の色名応答は、色のモードの変化を測定する上で有効な測定手法となる¹¹⁾¹⁴⁾。

これまでに、CIE演色指数が基本色カテゴリーに対しても有効であることを示した研究¹⁵⁾や、情報提示ディスプレイでの配色における基本色の重要性を示した研究¹⁶⁾が行われているが、今後は色再現等の分野においても、基本色の認識特性を応用した研究が増えるものと思われる。

また、チンパンジーも人間とほとんど同じ基本色カテゴリーの認識をしているとの報告¹⁷⁾は、生理学的な要因によって基本色の認識特性が決定されていることを示す証拠の1つともなりえることから重要な知見といえよう。

2. 3 生理学的研究

サルのIT野において、基本色に類似した特定の色カテゴリーに応答する細胞が発見されており¹⁸⁾、これは基本色認識メカニズムが脳内に存在することを示す決定的証拠とも言える。最近、視覚皮質野V1においても、特定の色領域に反応する細胞が見つかった¹⁹⁾が、IT野の細胞の反応とは異なっていることから、基本色反応のサブシステムがV1野以降に存在する可能性も示唆されている²⁰⁾。外側膝状体におけるpLGN (parvo-LGN)では、このような非線形性を有する細胞は見つかっていないことから、V1野が基本色をカテゴライズするために必要な非線形変換過程のスタート地点であると考えられる。このような初期視覚皮質における非線形反応細胞は、他の研究結果からも発見されており、例えばV2やV4野においてbrownやblackに選択的に反応する細胞が見つかった²¹⁾。

また、サルのV4領域を切除しても、4つの基本色(primary color=Red, Green, Yellow, Blue)の判定能力は保持されることから、これら4つのカテゴリーはV4より前の段階において既に形成されていると考えられる²²⁾。

以上の結果をまとめると、pLGN~V1~V2において根源色カテゴリー(R, G, Y, B)が、V1~V4~IT野においてその他の色カテゴリー(nonprimary color = Orange, Purple etc.)が段階的に、しかし比較的連続的に形成されていると推測される。

2. 4 計算論的研究

Dufort らは、色覚メカニズムの階層性を考慮した上で、マンセル色票における red, green, blue, yellow の色カテゴリーを説明する計算モデルを提案している²³⁾。しかし、4つの色カテゴリーだけしか検討しておらず、その予測度はそれほど高くない。

Kay&McDaniel は、B&K の色彩語進化過程をファジー理論 (fuzzy theory) を用いて説明した²⁴⁾。彼らは、red, green, blue, yellow, white, black の6色を根源色 (primary basic colors) とし、それらの波長に対するメンバーシップ関数 (membership function) を定義した。例えば、B&K 理論の Stage I は、white \cup red \cup yellow と black \cup green \cup blue の2つの和集合で表現された段階と考える。Stage V までは、和集合が段階的に分断される過程と考え、Stage VI と VII は根源色のメンバーシップ関数の共通集合 (積集合) の段階と考える。すなわち、brown=yellow \cap black, pink=white \cap red, purple=red \cap blue, orange=red \cap yellow, gray=black \cap white で表わされる。

Lammens は、正規ガウス関数を用いた色カテゴリー化の計算モデルを提案し、画像中の色名を決定できる software-application を作成した²⁵⁾。しかし、そのモデルは本質的に色空間分割モデルであり、心理学的・生理学的知見が反映されているものではない。

Okajima らは、反対色のエレメンタルカラーネーミングと基本色のカテゴリカルカラーネーミングを同一被験者かつ同一色刺激に対して行い、反対色応答から基本色応答を定量的に導出するネットワークモデルを提唱した²⁶⁾。根源色 (red, green, blue, yellow, white, black) と派生色 (brown \propto red \times yellow \times black, pink \propto white \times red, purple \propto red \times blue, orange \propto red \times yellow, gray \propto black \times white) のセルの応答の最大値が基本色の色名として選択されるというモデルを使って、基本色の実験結果を色の見えのモードに依らず精度良く説明できることを示した。

今後、基本色の認識メカニズムの全貌を明らかにするためには、生理学的研究と計算論的研究とが互いに補足・連携しあうことが特に重要であると考えられる。

参考文献

- (1) B. Berlin and P. Kay: Basic Color Terms: Their Universality and Evolution", CSLI Publications (1999)
- (2) B. A. C. Saunders and J. van Brakel : Are There Nontrivial Constraints on Colour Categorization? Behav. Brain Sci., 20, 167-228 (1997)
- (3) J. Davidoff, I. Davies and D. Robertson : "Colour Categories in a Stone-Age Tribe", Nature, 398, 203-204 (1999)
- (4) R. M. Boynton and C. X. Olson : Locating Basic Colors in the OSA Space. Color Res.Appl., 12, 94-105 (1987)

- (5) K. Uchikawa and R. M. Boynton : Categorical Color Perception of Japanese Observers: Comparison with That of Americans. *Vision Res.* **27**, 1825-1833 (1987)
- (6) R. M. Boynton, R. E. MacLaury and K. Uchikawa : Centroids of Color Categories Compared by Two Methods. *Color Res.Appl.*, **14**, 6-15 (1989)
- (7) R. M. Boynton and C. X. Olson: Saliency of Chromatic Basic Color Terms Confirmed by Three Measures. *Vision Res.*, **30**, 1311-1317 (1990)
- (8) R. M. Boynton, L. Fargo, C.X. Olson and H. S. Smallman.: Category Effects in Color Memory. *Color Res.Appl.*, **14**, 229-234 (1989)
- (9) J. Sturges and T. W. A. Whitfield : Locating Basic Colours in the Munsell Space. *Color Res. Appl.*, **20**, 364-376 (1995)
- (10) J. Sturges and T. W. A. Whitfield : Salient Features of Munsell Colour Space as a Function of Monolexic Naming and response Latencies. *Vision Res.*, **37**, 307-313 (1997)
- (11) H. Shinoda, K. Uchikawa and M. Ikeda : Categorized Color Space on CRT in the Aperture and the Surface Color Mode. *Color Res. Appl.* **18**, 326-333 (1993)
- (12) S. Guest and D. V. Laar : The Structure of Colour Naming Space. *Vision Res.* **40**, 723-734 (2000)
- (13) K. Uchikawa and H. Shinoda : Influence of Basic Color Categories on Color Memory Discrimination. *Color Res. Appl.* **21**, 430-439 (1996)
- (14) H. Uchikawa, K. Uchikawa and R. M. Boynton : Influence of Achromatic Surrounds on Categorical Perception of Surface Colors. *Vision Res.* **29**, 881-890 (1989)
- (15) R. M. Boynton, L. Fargo and B. L. Collins : Categorical Color Rendering of Four Common Light Sources. *Color Res.Appl.*, **15**, 222-230 (1990)
- (16) H. S. Smallman and R. M. Boynton : Segregation of Basic Colors in an Information Display. *J. Opt. Soc. Am. A.*, **7**, 1985-1994 (1990)
- (17) T. Matsuzawa : Colour Naming and Classification in a Chimpanzee (*Pan troglodytes*). *J. Human Evolution*, **14**, 283-291 (1985)
- (18) H. Komatsu, Y. Ideura, S. Kaji and S. Yamane : Color Selectivity of Neurons in the Inferior Cortex of the Awake Macaque Monkey. *J. Neurosci.*, **12**, 408-424 (1992)
- (19) A.Hanazawa, H. Komatsu and I. Murakami : Neural Selectivity for Hue and Saturation of Colour in the Primary Visual Cortex of the Monkey. *Euro. J. Neuroscience*, *in press* (2000)
- (20) H. Komatsu : Mechanisms of Central Color Vision. *Curr. Opinion in Neurobiology.* **8**, 503-508 (1998)

- (21) T. Yoshioka, B. M. Dow and R. G. Vautin : Neuronal Mechanisms of Color Categorization in Areas V1,V2 and V4 of Macaque Monkey Visual Cortex. *Behav. Brain Res.*, **76**, 51-70 (1996)
- (22) V. Walsh, J. J. Kulikowski, S. R. Butler and D. Carden : The Effects of Lesions of Area V4 on the Visual Abilities of Macaques: Colour Categorization. *Behav. Brain Res.*, **52**, 81-89 (1992)
- (23) P. A. Dufort and C.J. Lumsden : Color Categorization and Color Constancy in a Neural Network Model of V4. *Biol. Cybern.*, **65**. 293-303 (1991)
- (24) P. Kay and C. K. McDaniel : The Linguistic Significance of the Meaning of Basic Color Terms. *Language*, **3**, 610-646 (1978)
- (25) J. M. Lammens : A Computational Model of Color Perception and Color Naming. Technical Report, Department of Computer Science, State Univ. of New York at Buffalo (1994)
- (26) K. Okajima, A. R. Robertson and G. H. Fielder : Color Vision Model for Opponent and Categorical Color Perception. *Proceedings of the 8th Congress of the International Colour Association (AIC Color 97)*, 203-206 (1997)

(岡嶋克典)

第3章 照明環境に応じたカテゴリカル色認識特性

3.1 カテゴリカル色認識特性に関する研究まとめ

カテゴリカル色認識についてのデータは、色コードの設計、カテゴリカルな色彩評価、さらに高次の認知特性を組み込んだ色覚モデルの構築など、幅広い分野に有用な情報を提供する。この節では、カテゴリカル色認識特性に関する研究を概観し、その測定方法や観察条件などをまとめることにする。

表 3-1-1 はカテゴリカル色領域を測定した主な研究について実験方法や観察条件をまとめたものである。それぞれの研究の目的は同一ではなく、その重点の置き方も異なるが、以下ではカテゴリカル色領域の測定方法に着目して、これらの研究を概観していくことにする。ここで表の左端は論文に付した番号であり、その次のコラムに著者名と掲載年を記してある。出典の詳細はこの節の末尾にまとめた。

まず、色刺激のカテゴリーの決定方法は、被験者が呈示された色刺激の色名を答える方法が主流である。この色名回答法には回答の選択肢としてどのような色名を許すかによっていくつかのやり方がある。Boynton & Olson¹⁾ は、単一の単語による色名回答 (monolexic color naming) を採用した。例えば、red, blue, beige などは使用できるが、dark green, reddish yellow などの単語の複合による表現は許されない。Uchikawa & Boynton²⁾ と Sturges & Whitefield³⁾ も同様の単一色名回答方法を採用している。これらの研究では得られた色名を最終的には Berlin & Kay¹¹⁾ が提唱した 11 の基本色名にまとめて、それらの領域や焦点となる色を求めている。Middleton & Mayo⁴⁾ の研究は、この基本色名が提唱される以前のものであるが、あらかじめ指定された Red, Orange, Yellow, Green, Blue 及び Purple の 6 つの色名によって、マンセルバリュー = 6 の色票を同定することが求められた。Ishida⁶⁾ の研究もあらかじめ使用できる色名を指定する方法を採用しており、ここでは 11 の基本色名に加えて黄緑と青緑の色名が回答の選択肢に加えられている。Shinoda 他⁷⁾、内川他⁸⁾、Yaguchi 他⁹⁾、瀬川他¹⁰⁾ の研究では 11 の基本色名が回答の選択肢とされた。色名を回答する以外の方法としては、例えば、石田他⁵⁾ の研究のように、多数配置された色票から指定された色名の色票を選択する方法がある。佐川¹²⁾ も指定された色票の色と類似していると判断された色票を、多数の色票の中から選択する方法を採用した。色名回答法と色票選択法による結果の相違などについては今後の検討が必要だろう。

これらの研究で使用された色票は OSA 色票、マンセル色票のいずれかである。それぞれの色票を互いに変換ことは可能であり、使用色票の相違は結果の比較の上では本質的に困難な問題にはならない。一方、Shinoda 他⁷⁾ と内川他⁸⁾ は CRT モニターに呈示された色を刺激とし、その背景輝度を変えることによって色刺激の見えを物体色モードと開口色モードに設定し、双方のモードにおけるカテゴリカル色領域を測定している。

次にこれらの実験における刺激呈示条件について見てみよう。色刺激の大きさはいずれも視角 2 ~ 4° 程度である。これは色覚特性の測定では標準的な大きさであり、この範囲の大きさであれば実験結果の相互比較も妥当なものになるだろう。ただし現実の色の使用状況を考えると、さらに小さな色刺激についてのデータも必要である。色刺激の

背景には、ほとんどの研究が $N=5$ の灰色を採用している。この背景条件も標準的な設定であり、結果の相互比較の上では都合が良い。しかしながら、色の見えが背景によって強く影響されることを考えると、背景条件の違いによるカテゴリカル色領域の変化も重要なデータとなり、今後の課題の一つとなる。

照明条件については、白色の照明光源による明所視レベルでの実験条件がほぼ各研究の共通項となっており、この条件に関しては相当のデータの蓄積がなされている。さらに最近では、照度レベルや光源の分光分布を実験のパラメータとした研究も行われている。照度レベルの変化に応じたカテゴリカル色領域の変化は、4, 5, 6, 7の研究において調べられている。それらの研究結果には、緑～青領域の色カテゴリーの変化などについて一致した傾向が見られるようである。特に Ishida⁶⁾の研究は、広範囲の色票を用いて薄明視領域の色同定特性を多数の被験者に対して調べたものであり、系統的なデータを提供している。光源の分光分布による影響は Yaguchi ら⁹⁾によって調べられている。14種の照明ランプ毎に色票のカテゴリカル領域の変化を求めており、貴重なデータを提供している。今後は、さらに被験者数を加えて、データの信頼性を高めることも必要だろう。

個々で簡単に概観したように、今日、カテゴリカル色認識の研究にはかなりの積み重ねがなされていると言って良いだろう。特に標準的な観察条件 ($2 \sim 4^\circ$, 背景 N5, 白色光源, 明所視) においては、カテゴリカル色領域のデータは多くの研究によって得られている。これらを何らかの共通の色空間上で表現できれば、カテゴリカルな色特性を活用する際の有益なデータベースとなるものと考えられる。また、照度条件^{5), 10)}や光源分光分布⁹⁾を条件としたカテゴリカル色領域の測定もなされており、今後は照明環境に応じたカテゴリカル色認識特性の定量化が進められるものと期待される。さらに、観察視野位置¹⁰⁾の影響、観察者の加齢¹²⁾による影響も検討され、より一般的な条件を包括したデータの確立も射程に入っているといえよう。一方、刺激サイズや背景色などの基本的な条件の影響を検討した研究は以外と少なく、今後の課題として残されている。

カテゴリカル色認識の特性データを確立するためには、より広範なデータの収集が必要となるだろう。また一方で、色覚機構や認識過程を理論的に検討することによって、カテゴリカル色認識の理論的なモデルを構築することも望まれる。それによって、測定データに対する理論的な裏付けを与えるとともに、多様な条件に対する予測も可能になる。カテゴリカル色認識を理論的な側面から検討した研究は次章で紹介される。第3章の以下の節では、ここで取りあげた研究のいくつかについて、その実験方法や結果の詳細を説明する。これらは本委員会の委員が関与した研究であり、最新の結果も含めて有益なデータを提供するものとする。

(石田泰一郎)

参考文献

- 1) R. Boynton and C. Olson: "Locating basic colors in the OSA space", *Color Research and Application*, 12, 94-105 (1987)
- 2) K. Uchikawa and R. Boynton: "Categorical color perception of Japanese observers: Comparison with that of Americans", *Vision Research*, 27, 1825-1833 (1987)

- 2) K.Uchikawa and R.Boynton: "Categorical color perception of Japanese observers: Comparison with that of Americans", *Vision Research*, 27, 1825-1833 (1987)
- 3) J.Sturges and T.Whitfield: "Locating basic colours in the Munsell Space", *Color Research and Application*, 20, 364-376 (1995)
- 4) W.Middleton and E.Mayo: "The appearance of colors in twilight" *Journal of the Optical Society of America*, 42, 116-121 (1952)
- 5) 石田泰一郎, 清水友恵, 池田光男: "照度レベル変化に伴う表面色の同定特性", *日本色彩学会誌*, 19, 121-129 (1995)
- 6) T.Ishida: "Systematic measurement of color identification under wide range of illuminance levels", *Proceedings of the 24th CIE session*, 1(1), 57-61 (1999)
- 7) H.Shinoda, K.Uchikawa and M.Ikeda: "Categorized color space on CRT in the aperture and the surface color mode", *Color Research and Application*, 18, 326-333 (1993)
- 8) 内川恵二, 栗木一郎, 篠田博之: "開口色と表面色モードにおける色空間のカテゴリカル色名領域", *照明学会誌*, 77, 77-82 (1993)
- 8) H.Yaguchi et al.: "Categorical color rendering of various light sources", *Proceedings of the 24th CIE session*, 1(1), 62-64 (1999)
- 9) 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カル色知覚", *照明学会誌*, 83, 860-868 (1999)

表3-1-1 カテゴリカル色認識研究における実験方法の比較

No.	authors (year)	method	category	color sample	test size	surround	light level	light source	subject
1	Boynton, Olson (1987)	単一色名回答	11基本色	424, OSA色票	3.8 x 3.8 cm (= 4 deg)	N5	N5背景 : 40 cd/m ²	200W photoflood lamp, 3200K	7
2	Uchikawa, Boynton (1987)	単一色名回答	11基本色	424, OSA色票	3.8 x 3.8 cm (= 4 deg)	N5	N5背景 : 40 cd/m ²	200W photoflood lamp, 3200K	10
3	Sturges, Whitfield (1995)	単一色名回答	11基本色	446, マンセル色票	5.2 x 3.3 cm (65cm)	N7	1000 lx	approximated CIE Standard Illuminant D65	20
3	Middleton, Mayo (1952)	指定色名回答	R, Or, Y, G, B, P	64, マンセル色票	2 deg	N6	photopic, 1.4, 0.44, 0.14, 0.044, 0.014, 0.005 lx	タンガスデンランプ, フィルターにより6500K	3 (1)
4	石田, 清水, 池田 (1995)	色票選択	R, Or, Y, YG, G, BG, B, P	8, マンセル色票	5 x 5 cm (= 4 deg)	N5	1000, 10, 1, 0.1, 0.03, 0.01 lx	高演色型蛍光ランプ 約 5300K	4
5	Ishida (1999)	指定色名回答	11基本色 + YG, BG	156, マンセル色票	3 x 3 cm (= 2.5 deg)	N5	1000, 10, 1, 0.1 lx	高演色型蛍光ランプ 約 5300K	15
6	Shinoda et al. (1993)	指定色名回答	11基本色	CRT 40, 30, 20, 10, 5, 2 cd/m ²	5 x 5 cm (= 2 deg)	暗黒 灰 29.6 cd/m ²	---	---	3
7	内川, 栗木, 篠田 (1993)	指定色名回答	11基本色	CRT 424, OSA色票	5 x 5 cm (= 2 deg)	暗黒 灰 29.6 cd/m ² OSA L=-2	色票の場合 L=-2背景 : 25.5 cd/m ²	色票の場合 スライドプロジェクター (フィルターにより 6500K)	3
8	Yaguchi et al. (1999)	指定色名回答	11基本色	292, マンセル色票	5.5 x 7.0 cm	N5	1000 lx	D65, EX-L, EX-N, W, R100, G100, G55R45, G80R20, H, HF, MHL, NH, NX, IL	4
9	瀬川, 内川, 栗木 (1998)	指定色名回答	11基本色	205, OSA	4 deg	N5	2000, 5, 0.1 lx	蛍光ランプ D65 type	3
10									

3.2 照度レベルに応じた色の同定特性の測定

3.2.1 はじめに

今日の生活環境では、交通信号、案内標識、色による分類、ラベリング、領域区分、操作パネルやディスプレイ、商業広告など、およそあらゆる場面で色が用いられている。ここで使用される色は、視覚的な探索や分類の手がかりとして、あるいは、ある種の意味を付加する符号として機能している。このような色を適正に活用し、人と環境との円滑な関係を実現できれば、私たちの生活環境の安全性、快適性の質的向上に寄与するところ大であろう。

色情報が適正に機能するためには、その色が意図された色として正しく認識されることが前提である。ただし、色の見えはその周辺条件や観察条件によって変化する。表面色の場合は、特に照度レベルによる影響が大きい。照度変化に伴う表面色の見えの変化については、これまでも多くの研究がなされている。例えば、低照度での表面色の見えがカラーネーミング法¹⁾や両眼隔壁等色法²⁾によって測定されており、知覚される色相の変化などが検討されている。また、様々な照度レベルでの表面色の明るさ³⁾の変化や目立ち⁴⁾の変化も調べられている。これらの研究によって、照度が低下するに伴って、表面色の色みの減少、相対的な明るさや目立ちの変化、さらに色相も変化する事が報告されている。したがって、明るい環境で効果的に機能した色が、薄暗い環境においては見分けがつかなくなったり、別の色に誤認される恐れすらある。色情報の適正な活用のためには、照度レベルに応じた色の見えの変化を理解し、その特性に基づいた色情報の設計が求められる。

ところで、色をある種の符号として活用する際には、微妙な色の見えそのものよりも、それが何色として認識されるか、つまり色の同定が重要になると思われる。色の見えは色度図上で連続的に変化するが、ある程度離散的に色度領域を設定すれば、離散的なカテゴリーに分化した色の見えを得ることができる。例えば、赤、黄、緑、青などの色名で表現される色の見えである。11の基本色^{5,6)}はそのもっとも効率的な区分のひとつである。このような明確なカテゴリー区分がなされるため色による分類や意味の付加が可能になるのである。したがって、種々の光環境のもとで色を適正に活用するためには、照度レベルに応じた色のカテゴリーカルな同定特性について系統的なデータを整備することが必要になる。

ところで照度レベルに応じた色の同定特性を系統的に調べた研究は以外と少ない。MiddletonとMayo⁷⁾は、明度6の広範囲の色票を、6つの色名(赤、オレンジ、黄、緑、青、紫)によって回答する実験を行い、薄明視領域における色領域の変化を算出している。そこでは、照度の低下によって緑の領域に青が進出することなどが明らかにされているが、全結果が示されている被験者は1人だけであり、データの不足は否めない。また、石田ら⁸⁾は色相環をめぐる8色を用いて、照度変化に伴う色の同定を調べている。その結果、薄明視領域では、緑、青緑、青の間で色の混同が生じて、同定の精度が顕著に低下することを示した。ただし、実験で使用された色票は8色に限られており、色の誤認の結果も限定的な解釈に留まる。

そこで、我々は、マンセル色空間の広範囲から色票を選択し、被験者をできるだけ多く採用することに留意し、明所視から薄明視の下限近くまでの照度における色同定の特性を測定した。それによって照度レベルに応じた色同定の特性を系統的に検討した⁹⁾。

3.2.2 実験方法

色の同定は、提示された色票に対して、あらかじめ指定された色名の中からひとつの色名を選んで回答することによって行った。指定した色名は、赤、オレンジ、黄、黄緑、緑、青緑、青、紫、ピンク、茶、白、黒、灰の13色である。これらの色は、4つのユニーク色（赤、黄、緑、青）及びその組み合わせによる8色、カテゴリカル基本色に含まれるピンクと茶、および無彩色として白、灰、黒を加えたものである。

使用する色票は、マンセル色票（管理色票、日本色彩研究所）から、バリューは $V = 4, 6, 8$ の平面を選択し、それぞれの平面上で色相については20のヒュー（ $H = 5R$ から5ステップ）を設定し、クロマについては、それぞれの色相上で $C = 2, 6, 10$ を基本として、色票セットに含まれる色票を選択したが、それ以上のクロマ、中間のクロマの色票も選択している。さらに、無彩色の $N = 1, 2, 4, 6, 8, 9.5$ を加えることにより、実験で採用した色票は全部で156枚である。

照度レベルは1000, 10, 1, 0.1lxの4段階を設定した。実験は、照度可変のブース内で行った。光源は高演色性の昼白色蛍光灯である。蛍光灯の点灯本数、中央のランプに取り付けられた遮光板の開閉、及びランプの調光によって照度を調節する。色票はブース内の実験台の上に置かれ、その上に30cm × 36cmの灰色（ $N=5$ ）の厚紙を背景としてかぶせる。色票は厚紙の中央にある3cm × 3cmの開口から観察する。観察距離は約70cmである。実験開始前には、被験者に色票が何色であるか答えること、及び、使用できる13の色名について十分説明した。また、答えるまでの時間制限は設けられない。色名の回答に加えて、色票を提示してから回答があるまでの時間も記録した。

実験セッションは、1000lxから0.1lxまで照度を段階的に低下させていく場合と、0.1lxから1000lxまで照度を段階的に上げていく場合がある。照度条件の切り替えの際には約5分間の順応を行った。また、低照度からセッションを開始する場合には、0.1lxにおいて20分間の暗順応を行った。156枚の色票は39枚ずつの4セットに分けた。各セッションの各照度条件に色票1セットを割り当てたことにより、4セッション行うことによって、各照度条件で全色票について1回ずつの回答が得られる。被験者1人当たり計8セッション行うことによって、各色票について各照度条件下で2回ずつ色名を回答してもらった。試行回数は被験者1人当たり1248回になる。

実験に参加した被験者は15人で、いずれも京都大学に所属する学生及び教官である。年齢層は20歳前半を中心として20～36歳であり、男性7名、女性8名である。全員、過去の色覚検査で異常は認められていない。このうち6名は著者の研究室所属で色についての興味や知識を有するが、残りの9名は他学科、他学部の学生である。

3.2.3 結果

図3-2-1に $V=4$ の面の色票に対する色の同定の結果を示す。4つのパネルがそれぞれ異なった照度レベルに対応している。○がプロットしてある位置が、実験で使った色票を表している。結果は15人の被験者の計30回の判断をすべて一緒に集計したものである。グラフには3タイプの結果が示されている。まず、○の中の記号は、その色票に対して50%以上の試行において回答があった色名を示している。例えば、○の中に「R」と記してあれば、その色票は半分以上の試行において「赤」という色名で回答されたことを示している。何も記号が記されていない○の場合は、全試行の半分以上を占めた色名がなかったことを意味している。次に、○が太線で記されている場合、この色票の回答は90%以上の試行において一致していたことを表している。さらに、○が二

れたことを示している。何も記号が記されていない○の場合は、全試行の半分以上を占めた色名がなかったことを意味している。次に、○が太線で記されている場合、この色票の回答は90%以上の試行において一致していたことを表している。さらに、○が二重になっている場合は、その色票に対する色名の回答時間の平均が1.5秒以下であったことを示している。図3-2-2、図3-2-3は、それぞれV=6, 8の面の色票に対する色同定の結果を表しており、データの表し方は図3-2-1と同様である。

まず、1000lxにおける結果を見てみると、あらかじめ指定された色名の領域が、それぞれ形成されていることが分かる。V=4では紫、青、緑、茶といった色が高い一致度で回答される領域がある。V=6では、茶の領域はオレンジで置き替わり、ピンクの回答も目立つ。明度が高いV=8では、黄が明確な領域を形成し、黄緑に対する高い一致度も見られる。赤の回答が90%以上の一致を見たのは、5R4/14のみであったことは興味深い。またしばしば指摘されるように、青の中心は5Bではなく、ややPの方向に偏っていることも表れている。

本研究の主たる興味は、このような色同定の特性が照度の低下によってどのように変化するか検討することである。まず、10lxにおける結果を1000lxのものと比較してみると、回答された色名については、それほど顕著な変化は見られない。しかしながら、回答の一致度についてはすでに低下が見られ、10lxであっても色の見えに劣化が生じていることを示唆している。1lxになると、色の同定特性には顕著な変化が見られる。全体として、色同定の一致度は一段と低下し、90%以上の一致度を維持している色票は数えるほどである。特にクロマ2の色票については色の判断は不安定なものになっている。V=4において、ピンク、茶と回答されていた色票が赤と回答されるケースが見られる。V=6では、ピンクと回答されていた色票がオレンジと回答されたり、緑の領域の回答の一貫性が失われている。ただし、V=4, 6において、青と紫の境界はほとんど変化していない。V=8では、緑の領域に青の回答が進出しているのが目立つ。最後に0.1lxの結果を見てみよう。色の回答の一致度はさらに低下し、90%以上の一致度の色票はなくなっている。また、無彩色の回答が増加している。各バリューにおいて、緑色の領域は青の回答でほぼ完全に置き換えられており、緑領域への青の進出が明らかに見られる。この青の進出は緑方向についてであり、紫方向には広がっていないことは、興味深い結果である。また、V=4においては、短い時間で赤の回答を得る色票が見られ、薄明視の下限に近い照度であっても、赤みの判断が直ちに可能であったことを示唆している。本研究で得られた色同定特性は、照度レベルに応じた色選択の最適化、照度変化に対して安定した色の選択、色を正しく同定させるために必要な照度の算定など、色を種々の光環境で活用する際の基礎データとして活用可能であろう。さらに、照度に伴う色同定の変化の特徴は、色の見えのモデルや色覚の基礎研究にとっても有益なデータとなることが期待される。

(石田泰一郎)

参考文献

- 1) 湯尻照: "照度レベルによる表面色の色の見えの変化: 刺激サイズの影響", 光学, 19, 97-104, 1990.
- 2) 門馬智春, 本間園乃枝, 矢口博久, 塩入諭, 羽石秀明, 三宅洋一: "両眼隔壁等色法による薄明視における表面色の見えの測定", 光学, 22, 273-280, 1993.

- 3) M. Ikeda and S. Ashizawa: "Equivalent lightness of colored objects of equal Munsell chroma and of equal Munsell value at various illuminances," *Color Res. Appl.*, 16, 72-80, 1991.
- 4) 芦澤昌子, 池田光男: "色の目立ちの照度レベルによる変化—プルキンエ移行の影響—", *照明学会誌*, 71, 612-617, 1987.
- 5) R.M. Boynton and C.X. Olson: "Locating basic colors in the OSA space," *Color Res. Appl.*, 12, 94-105, 1987.
- 6) K. Uchikawa and R.M. Boynton: "Categorical color perception of Japanese observers: Comparison with that of Americans," *Vision Res.*, 27, 1825-1833, 1987.
- 7) W.E.K. Middleton and E.G. Mayo: "The appearance of colors in twilight", *J. Opt. Soc. Am.*, 42, 116-121, 1952.
- 8) 石田泰一郎, 清水友恵, 池田光男: 照度レベル変化に伴う表面色の同定特性, *日本色彩学会誌*, 19, 121-129, 1995
- 9) T. Ishida: "Systematic measurement of color identification under wide range of illuminance levels", *Proceedings of 24th Session of the CIE*, 1-1, 57-61 (1999)

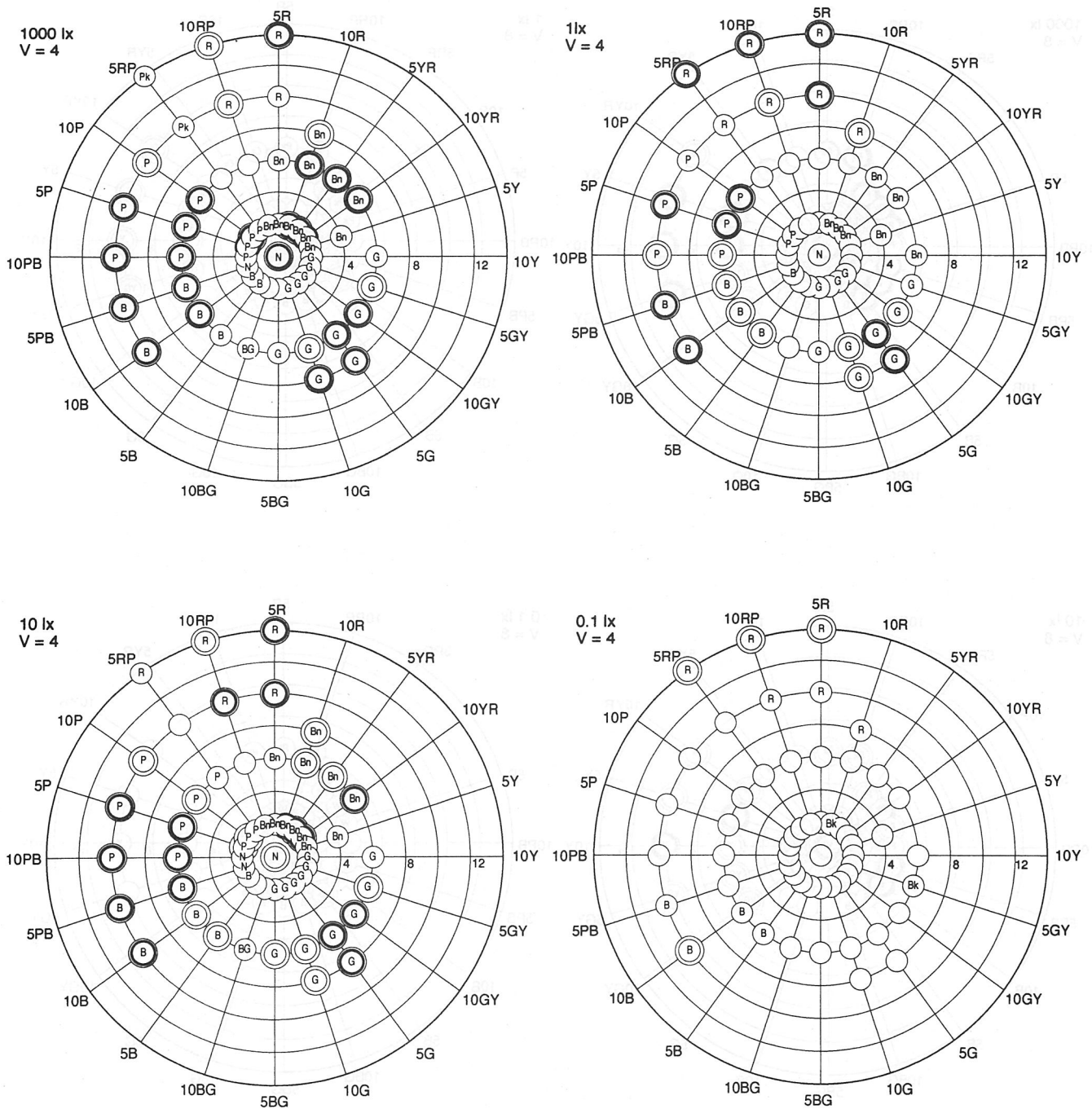


図 3-2-1： バリュウ V=4 の色票の色同定の結果：（照度条件：1000, 10, 1, 0.1 lx）

○，実験で使用した色票。色記号は 50%以上の試行で回答が一致した場合。

●，90%以上の試行で回答が一致した場合。◎（外側の円），回答時間の平均が 1.5 秒以下の場合。

色記号：R, 赤； Or, オレンジ； Y, 黄； YG, 黄緑； G, 緑； BG, 青緑； B, 青； P, 紫； Pk, ピンク； Bn, 茶； W, 白； N, 灰； Bk, 黒。

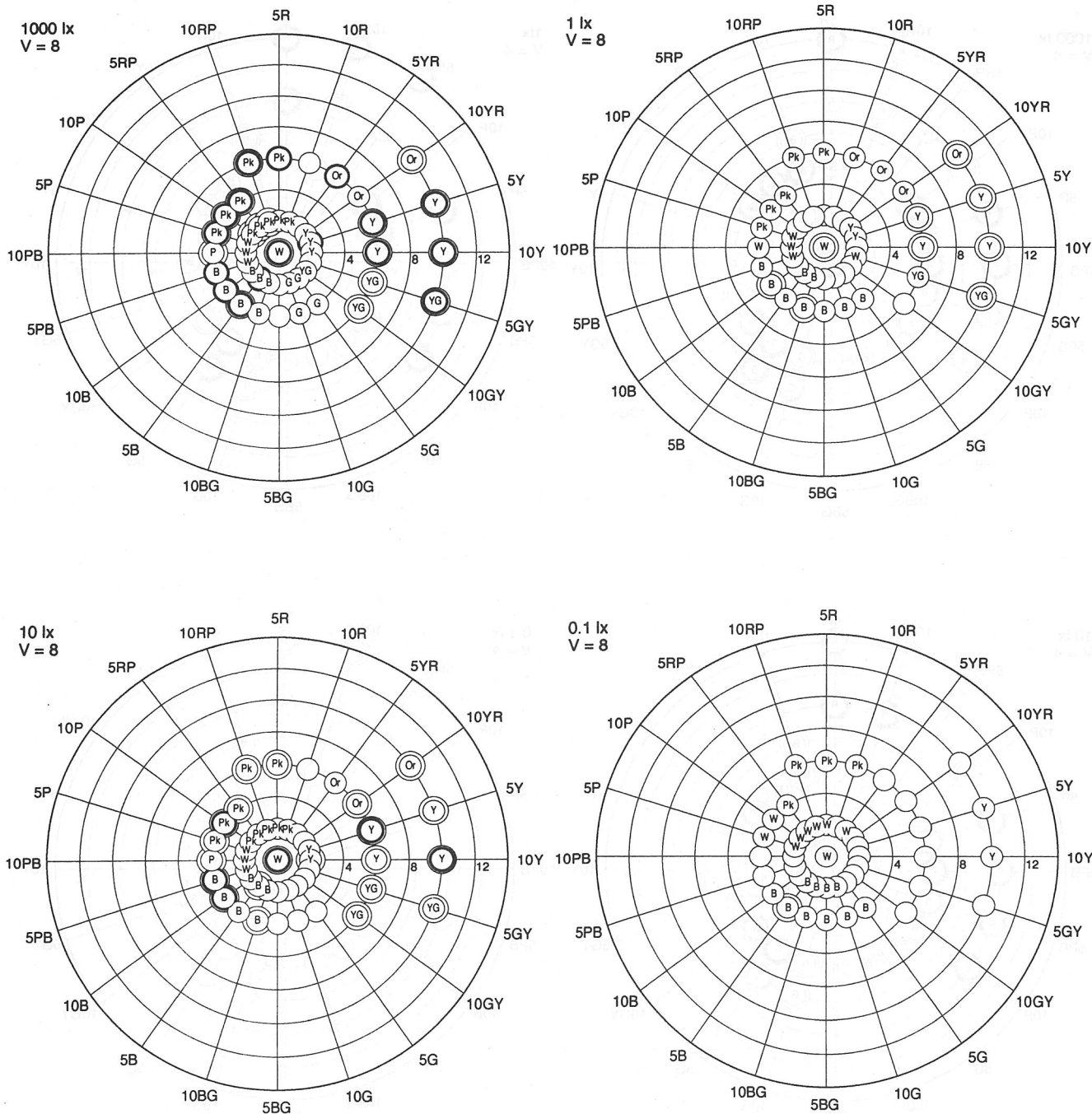


図3-2-3： バリュウ V=4 の色票の色同定の結果：(照度条件：1000, 10, 1, 0.1 lx)

○, 実験で使用した色票。色記号は50%以上の試行で回答が一致した場合。

●, 90%以上の試行で回答が一致した場合。◎ (外側の円), 回答時間の平均が1.5秒以下の場合。

色記号: R, 赤; Or, オレンジ; Y, 黄; YG, 黄緑; G, 緑; BG, 青緑; B, 青; P, 紫; Pk, ピンク; Bn, 茶; W, 白; N, 灰; Bk, 黒。

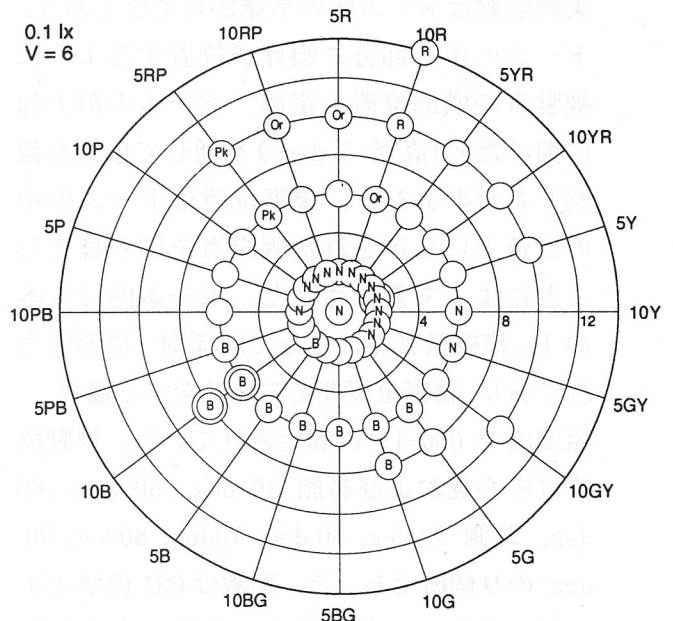
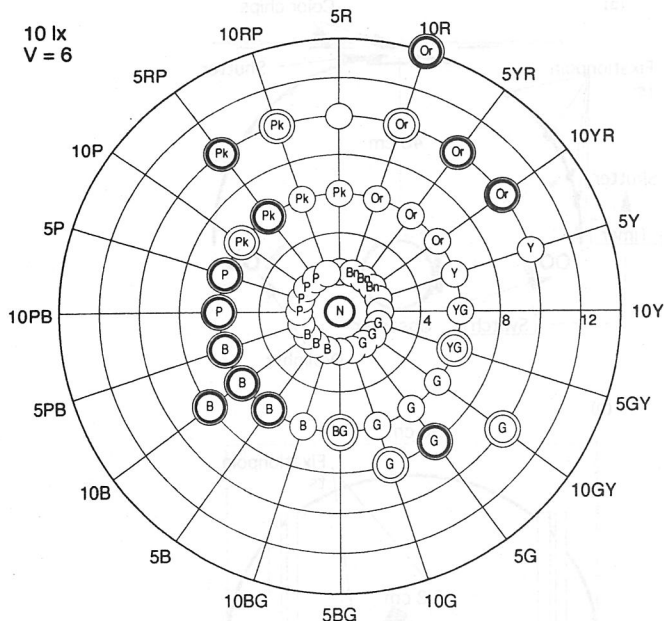
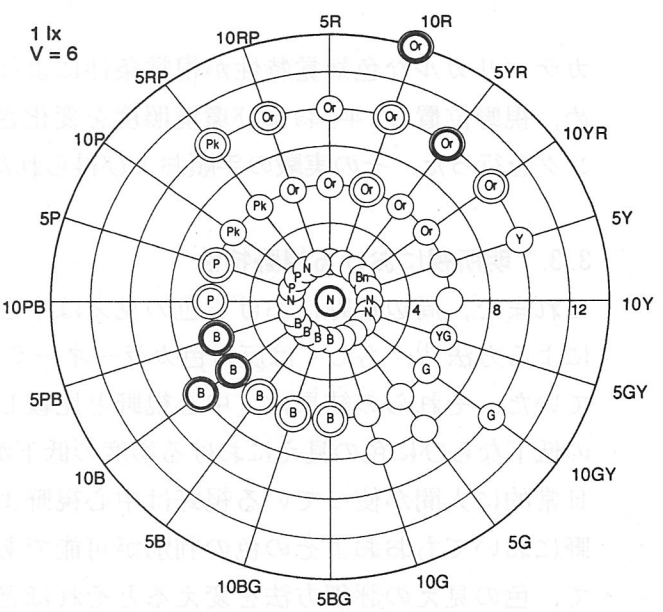
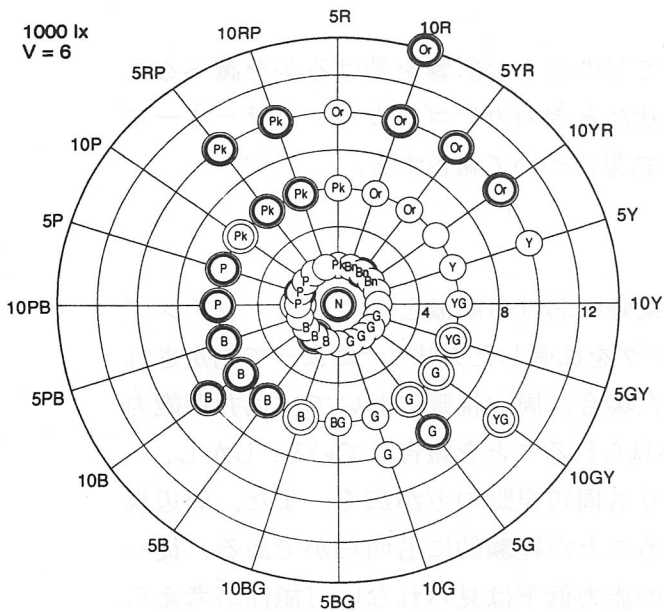


図 3-2-2: バリューV=4の色票の色同定の結果:(照度条件:1000, 10, 1, 0.1 lx)

○, 実験で使用した色票。色記号は50%以上の試行で回答が一致した場合。

●, 90%以上の試行で回答が一致した場合。◎(外側の円), 回答時間の平均が1.5秒以下の場合。

色記号:R, 赤; Or, オレンジ; Y, 黄; YG, 黄緑; G, 緑; BG, 青緑; B, 青; P, 紫; Pk, ピンク; Bn, 茶; W, 白; N, 灰; Bk, 黒。

3.3 カテゴリカル色知覚の照度及び視野特性

カテゴリカルな色知覚特性が視覚条件によってどのような影響を受けるかを調べるため、視野位置(水平)および環境照度を変化させたときのカテゴリカル・カラーネーミングを行った。その実験の手順および得られた結果について報告する。

3.3.1 明所視における視野特性

これまで、周辺視野における色の見えは中心視野における刺激とのカラーマッチングによる方法¹⁾、もしくは反対色カラーネーミングを拡張した方法^{2,3)}によって測定されていた。それらの結果は、中心視野と比較した場合、周辺視野においては色弁別能力の低下ならびに色の見えにおける彩度の低下が見られることを報告している。しかし、日常的に人間が使っている視野は中心視野よりも周辺視野の方が広く、また、周辺視野においてもおおよその色の判別が可能であることが経験的にも明らかである。従って、色の見えの評価方法を変えるとそれほどの能力低下は見られない可能性が考えられる。そこで、周辺視野に呈示した色票の色の見えを 11 基本色によるカテゴリカル・カラーネーミング⁴⁾によって評価する実験を行った。

実験装置はドーム状の半球からできており、ドームの中心部分に眼球が位置するように被験者の頭部位置を定め、ドームの頂上部に開けた穴(直径 4 deg.)を通して色票を観察した(図 3-3-1)。視野位置はドームの中の赤道上に呈示された固視点を切り替えることによって変化させた。ドーム内は 4 本の D₆₅ 模擬蛍光灯によってほぼ均一に照明されており、視野位置間での比較をする場合、照度は 2,000-1x に固定されていた。視野位置は中心窩および鼻側 30 deg, 50 deg, 60 deg, 耳側 30 deg, 50 deg, 70deg, 80deg, 90 deg の 9 個所であった。刺激は OSA 色票 424 枚で、各色票に付いて 3 名の被験者が 2 回ずつカテゴリカル・カラーネーミングを行った。被験者は、いわゆる 11 基本色名の中から 1 色のみを口頭で報告した。視野位置については、セッション毎にランダムな順番で切り替えた。呈示時間はタイマー制御のシャッターによって 3 秒に固定し、被験

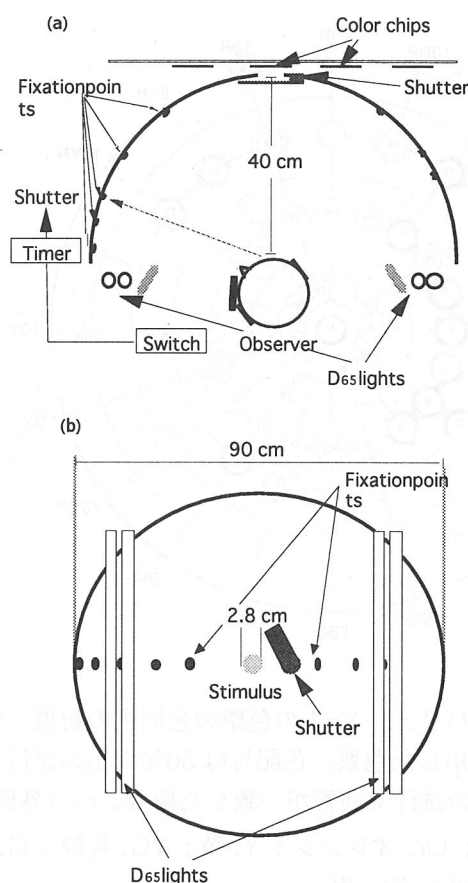


図 3-3-1 実験装置図

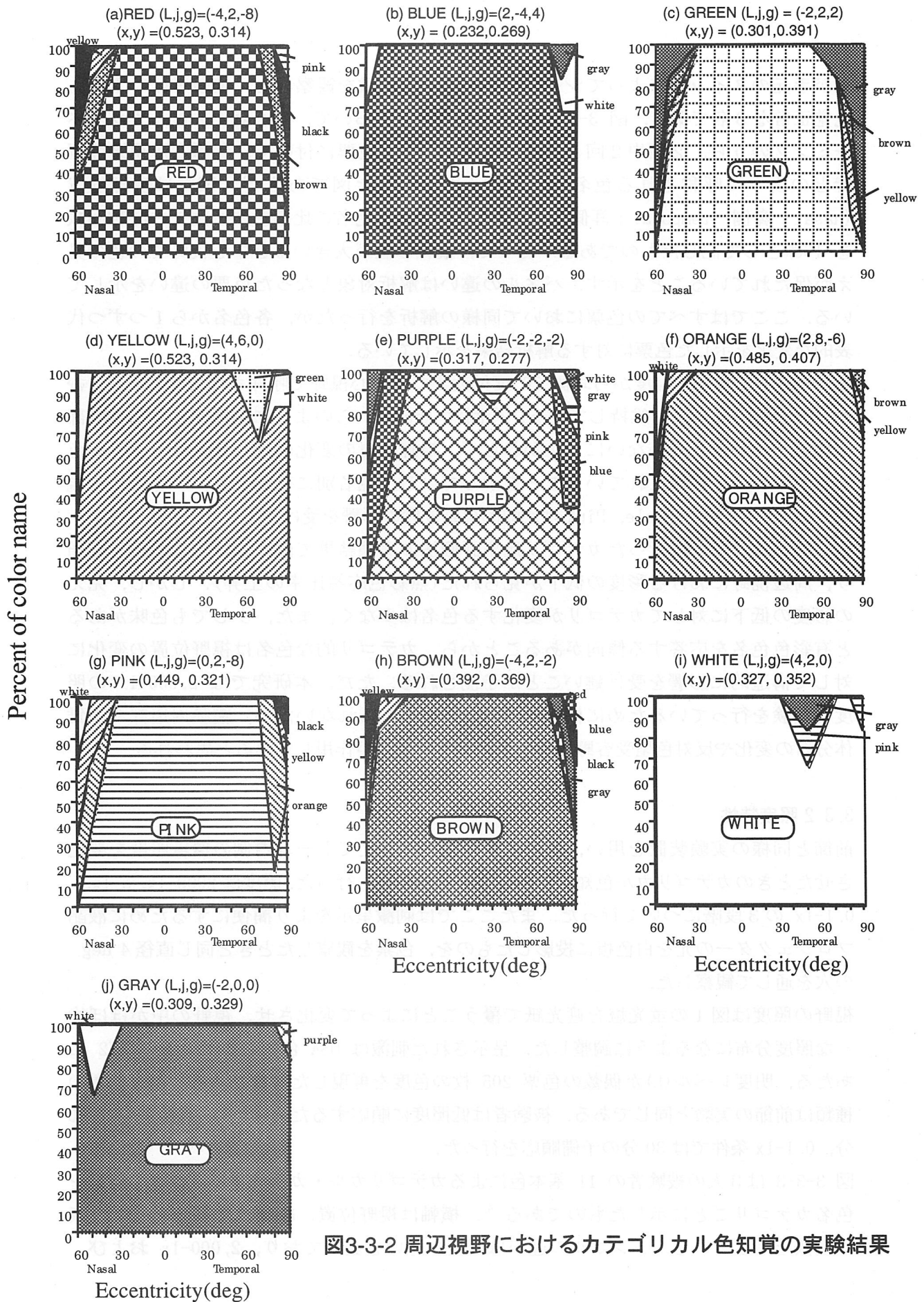


図3-3-2 周辺視野におけるカテゴリカル色知覚の実験結果

者が手元のスイッチによってシャッターを開いて刺激を観察した。被験者はいずれも色覚正常な3名である。図 3-3-2 は3名の被験者において、中心窩におけるカラーネーミングのうち、2回中2回とも同じ色名を答えた色票に付いて、各種右辺視野位置でどのように呼称される色名が変化するかを示した図である⁵⁾。横軸は視野位置 (nasal: 鼻側, temporal: 耳側)、縦軸は呼称された色名の比率を中心窩での呼称回数を100%として記したものである。従って、縦軸の値が大きいほど中心視野での色の見えが保たれていることを示す。パネルの違いは解析対象となった色票の違いを示している。ここではすべての色票において同様の解析を行ったが、各色名から1つずつ代表的な変化を示した色票に対する解析結果を示している。

全体を通して鼻側30度から耳側70度付近までは中心視野で呼称された色名がおおむね80%以上の高い値を維持している。今回は Abramov らのように刺激サイズを網膜部位に応じて調整していないにもかかわらず、視野位置の変化に対してカテゴリカル色知覚がロバストに保たれていることを示している。色名別に視野位置による変化を観察すると、Green, Purple, Pink は比較的視野位置の影響を受けやすいことがわかる。

同じ観察条件で別に行ったカテゴリ比率評価法の実験結果では、先行研究の報告の通り、周辺視野における彩度の低下が見られた(無彩色応答比率の上昇)。しかし、見えの彩度の低下に対してカテゴリが変化する色名は少なく、また、少しでも色味があると有彩色色名を応答する傾向があることから、カテゴリ的な色名は視野位置の変化に対して構造的に影響を受け難いことが予測される。ただ、本研究では2,000-1xの照度で実験を行っているために桿体応答の混入は考えられないため、網膜周辺部での錐体分布の変化や反対色型受容野機構の変化などの要因が作用していると思われる。

3.3.2 照度特性

前節と同様の実験装置を用い、視野位置の変化に加えてドーム内側の環境照度を変化させたときのカテゴリカル色知覚特性についての測定も行った。照度は2000-1x, 5-1x, 0.1-1xの3段階について行った。またここでは刺激呈示をより簡便にするために液晶プロジェクターの光を白色板に投影したものを、色票を観察したときと同じ直径4 degの穴を通して観察した。

視野の照度は図1の蛍光灯を遮光紙で覆うことによって変化させ、視野の中がほぼ均一な照度分布になるように調整した。呈示された刺激は OSA 色票フルセットの1/2にあたる、明度レベル(L)が偶数の色票205枚の色度を再現したものである。視野位置の種類は前節の実験と同じである。被験者は低照度に順応するため、5-1x条件下では20分、0.1-1x条件では30分の予備順応を行った。

図 3-3-3 は3人の被験者の11基本色によるカテゴリカル・カラーネーミングの結果を色名カテゴリごとに示したものである⁶⁾。横軸は視野位置、縦軸は応答のあった色票の枚数を示している。シンボルの違いは照度の違いを表しており、2,000-1x および、

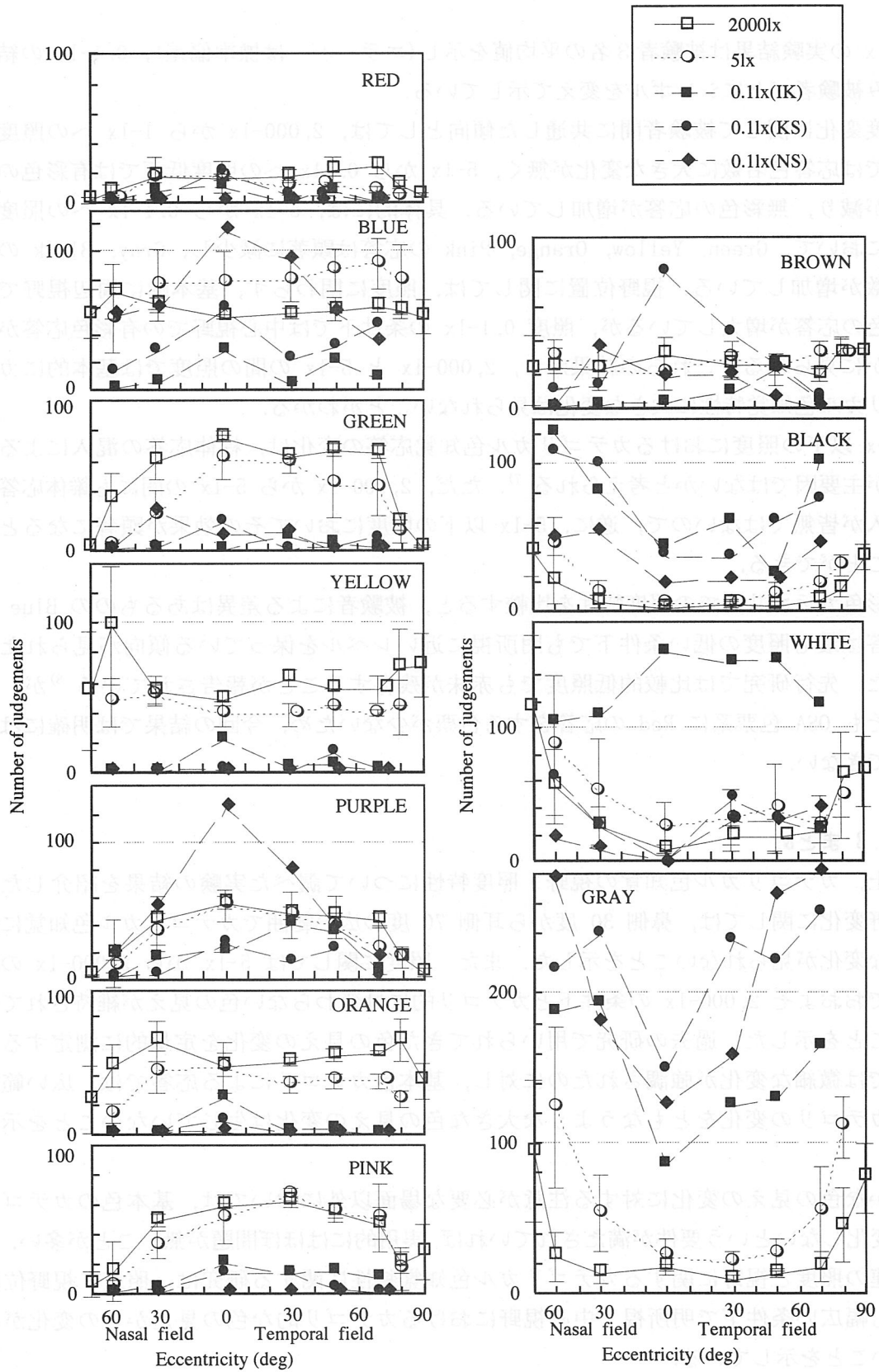


図3-3-3 照度・視野位置の変化におけるカテゴリカル色知覚特性

5-1x の実験結果は被験者 3 名の平均値を示し(エラーバーは標準偏差), 0.1-1x の結果のみ被験者ごとにシンボルを変えて示している。

照度変化に関して被験者間に共通した傾向としては, 2,000-1x から 1-1x への照度低下では応答色名数に大きな変化が無く, 5-1x から 0.11x への照度低下では有彩色の応答が減り, 無彩色の応答が増加している。具体的には, 5-1x から 0.1-1x への照度変化において, Green, Yellow, Orange, Pink の応答は顕著に減少し, Gray, Black の応答数が増加している。視野位置に関しては, 照度に関わらず, 基本的に周辺視野で無彩色の応答が増大しているが, 照度 0.1-1x の条件下では中心視野での有彩色応答がわずかに見られる。これらの結果から, 2,000-1x と 5-1x の間の照度では基本的にカテゴリカル色知覚特性に大きな変化は見られないことがわかる。

5-1x 以下の照度におけるカテゴリカル色知覚応答の変化は, 桿体応答の混入による影響が主要因ではないかと考えられる⁷⁾。ただ, 2,000-1x から 5-1x の間にも錐体応答の混入が皆無ではないので, 逆に, 5-1x 以下の照度においてその効果が顕著になると言うことができる。

有彩色カテゴリ間での照度特性を比較すると, 被験者による差異はあるものの Blue の応答は最も照度の低い条件下でも明所視に近いレベルを保っている傾向が見られた。また, 先行研究では比較的照度でも赤味が残存することが報告されている⁸⁾が, そもそも OSA 色票系に Red の応答をする色票が少ないため, 今回の結果では明確には確認できない。

3.3.3 まとめ

以上, カテゴリカル色知覚の視野・照度特性について調べた実験の結果を紹介した。視野変化に関しては, 鼻側 30 度から耳側 70 度の広い範囲でカテゴリカル色知覚に大きな変化が見られないことを示した。また, 照度に関しては 5-1x から 2,000-1x の範囲でおおよそ 2,000-1x の条件下とカテゴリ的には変わらない色の見えが維持されていることを示した。過去の研究で用いられてきた色の見えの変化を定量的に測定する方法では微細な変化が強調されたのに対し, 基本色カテゴリによる応答では, 広い範囲でカテゴリの変化をとまなうような大きな色の変化は生じていないことを示した。

細かな色の変化に対する注意が必要な場面以外においては, 基本色のカテゴリが変化しないという要件が満たされていれば, 実用的にはほぼ問題が無いことが多い。

一連の照度と視野に関するカテゴリカル色知覚特性に関する研究は, 照度・視野位置とも幅広い条件下で明所視・中心視野におけるカテゴリ的な色の変化からの変化が小さいことを示している。

カテゴリカル色応答は被験者間でも比較的安定した応答が得られることが分かっており⁹⁾, また, 複数の色名回答をさせることにより比較的細かな色の変化を測定

することも可能である¹⁰⁾。また、色の記憶において、色名カテゴリの境界が影響をおよぼすことが知られている。

カテゴリ的色知覚特性の研究はまだ少ないが、詳細な色の見えを測定する方法とは異なる、比較的実生活場面に則した指標として、さらなる研究が期待される¹¹⁾。しかしながら、必ずしもカテゴリ的な色の見えが変わらなければ目的が達成される場合ばかりでもないと考えられる。照明環境・観察環境の評価においてカテゴリカル色知覚の整合性を指標とすることには十分な注意が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 関口信利・池田光男：色の見えに基づく色視野の測定。日本眼科学会誌, **4**, 122-127 (1983)
- 2) I. Abramov, J. Gordon and H. Chan: Color appearance in the peripheral retina: effects of stimulus size. *Journal of the Optical Society of America*, **8**, 404-414 (1991)
- 3) 高瀬正典・内川恵二：明順応周辺網膜における色光の見え。光学, **20**, 521-529(1991)
- 4) R.M. Boynton and C.X. Olson: Salience of Chromatic Basic Color Terms confirmed by three measures. *Vision Research*, **30**, 1311-1317 (1990).
- 5) 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カル色知覚。照明学会誌, **83**, 860-868 (1999)
- 6) 瀬川かおり, 内川恵二：低照度レベルにおける周辺視野でのカテゴリカル色知覚の特性。照明学会誌, **84**, 281-289 (2000)
- 7) U. Stabell and B. Stabell: Color vision in the peripheral retina under photopic conditions. *Vision Research*, **22**, 839-944 (1982).
- 8) 石田泰一郎, 清水友恵, 池田光男：照度レベル変化に伴う表面色の同定特性。日本色彩学会誌, **19**, 121-129 (1995).
- 9) 内川恵二・栗木一郎・篠田博之：開口色と表面色モードにおける色空間のカテゴリカル色名領域。照明学会誌, **77**, 74-82, (1993).
- 10) 内川恵二・栗木一郎・篠田博之：カテゴリ比率評価法による開口色と表面色モードの色の見えの表現。照明学会誌, **78**, 83-93, (1994).
- 11) 内川恵二：カテゴリカル色知覚と高効率カテゴリカル蛍光ランプ。視覚の科学, **18**, 135-137 (1998).

(栗木一郎)

3.4 光源の分光分布

3.4.1 目的

我々は様々な光源の下で色を見ている。色の見えは順応による色恒常性のために光源の分光分布が多少変化しても、ほとんど変わらないことが知られている。これは白い紙が蛍光ランプの下でも夕暮れ時の太陽光の下でも白い紙と知覚できることから想像できる。しかし、色恒常性の働きは完全ではなく、光源の分光分布が変化すると同じ物体でも違った色に見えることがある。ここでは、光源が変わることによってカテゴリカル色知覚による色の見えがどのように変化するか示す。

3.4.2 実験

a. カテゴリカル・カラーネーミング法と11の基本色

実験方法としてカテゴリカル・カラーネーミング法を用いた。これは測定用光源で照明された実験ブース内で色票を観察し、所定の基本色名からその色票の見えを最も良く代表する色名で応答するものである。

ここで、被験者が応答できる色名を11色に制限した。これはBerlin&Kay¹⁾によって提案されたもので、彼らは98種の言語を調査し、十分に色彩表現が細分化した言語における色彩語の基本的なカテゴリは文化・人種に関わらず、赤・桃・橙・黄・緑・青・紫・茶・白・黒・灰の11色の基本色を含むという共通性を見いだした。

b. 実験装置

実験は図3-4-1に示す実験ブース内で行った。測定用光源は交換が出来るようになっている。また、拡散板としてアクリル板を用いて、観察平面で照度むらが起きづらいうようにした。実験ブース内の壁はつや消し黒で塗られており、観察する色票が提示される平面にはマンセルN5(反射率約20%)相当の灰色の紙が敷かれている。これは被験者の視野を十分にカバー出来るサイズである。被験者の後方は暗幕で覆われていて、実験ブース内に測定用光源以外の光が入らないようにしてある。照度は色票が置かれる所で1000 lxになるようにした。実験ブース内には色名分類箱が置かれている。これは縦に6、横に2に区切られていて全体に黒いラシャ紙が張られている。区切られた各々

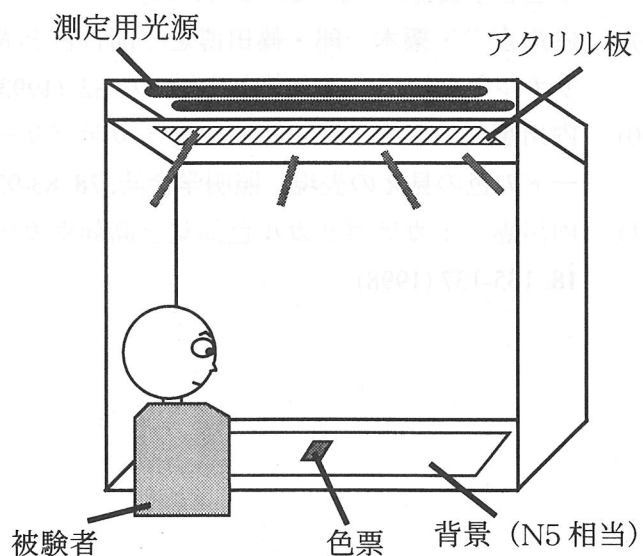


図3-4-1：実験ブースの概略図

のスペースには11の基本色名がひらがなで書かれている。また、色票観察時には出来るだけ視野に入らないような場所に置いた。

c. 色票

マンセル表色系を基に作られたJIS準拠管理色票。バリューとクロマが偶数のもの。ヒューが5,10のもの292枚を用いた。大きさは5.5×7 cm。

d. 光源

実験に用いた光源は蛍光灯8種類²⁾、HIDランプ5種類、白熱電球1種類の計14種類である。これらの光源の名称、略称、XYZ表色系における色度を表3-4-1に、色度をxy色度に示したものを図3-4-2に示す。また、各光源の分光放射分布は図3-4-3から図3-4-16に示す。

表3-4-1：使用した光源

種類	名称	略称	x	y
蛍光灯	D65近似	D65	0.3260	0.3434
	3波長域電球色	EX-L	0.4501	0.4084
	3波長域昼白色	EX-N	0.3526	0.3611
	白色	W	0.3867	0.3978
	緑色発光蛍光灯LAP	G100	0.3355	0.5483
	2波長域蛍光灯	G80R20	0.4178	0.4795
	2波長域蛍光灯	G55R45	0.4889	0.4250
HIDランプ	赤色発光蛍光灯YOX	R100	0.6045	0.3348
	水銀灯	H	0.3319	0.3935
	蛍光水銀灯	HF	0.3865	0.3895
	メタルハライドランプ	MHL	0.3247	0.3554
	高圧ナトリウム灯	NH	0.5399	0.4066
白熱電球	低圧ナトリウム灯	NX	0.5702	0.4281
	白熱電球	IL	0.4634	0.4120

e. 実験方法

前述した通り、実験はカテゴリカル・カラーネーミング法を用いて行った。被験者は測定用光源で照明された実験ブースに入り、5分間の順応を行う。次に合計292枚のマンセル色票を1枚ずつランダムに提示し観察する。色票は灰色背景上の決まった位置（印がついている所）に置くこととする。色票の色の見えがどの色名で表されるかを決定したら、色票分類箱に分類する。すべての色票は11の基本色のうちのどれかで応答することとし、それ以外の色名で応答することはできないものとする。実験は各光源につき、1人の被験者が3回行った。

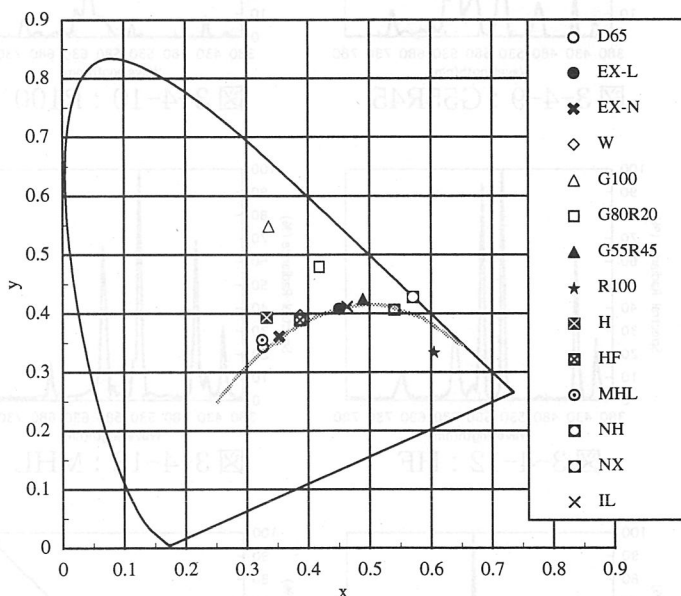
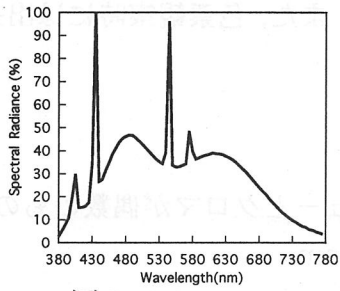


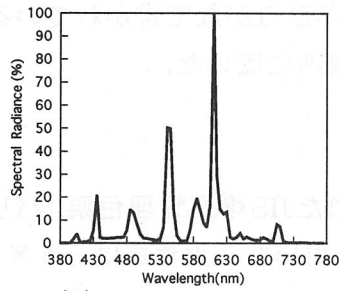
図3-4-2：各光源のxy色度図

f. 被験者

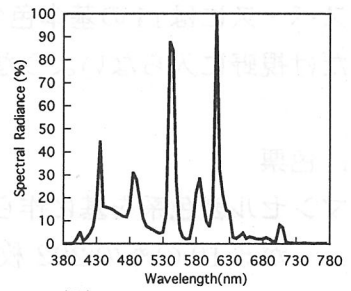
被験者はDS(22), HY(22)の男性2人とNU(21)の女性1人の色覚正常者3名である。



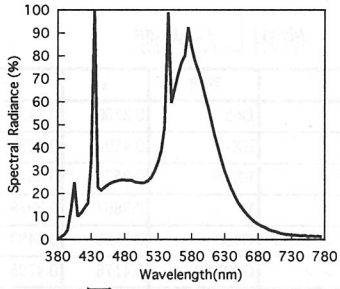
☒ 3-4-3 : D65



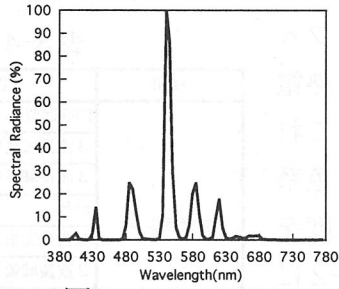
☒ 3-4-4 : EX-L



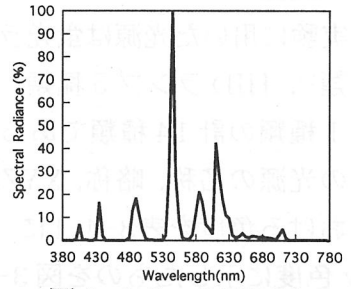
☒ 3-4-5 : EX-N



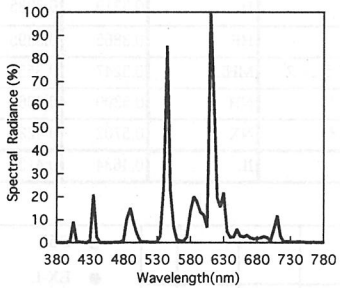
☒ 3-4-6 : W



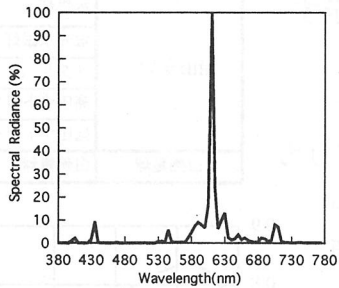
☒ 3-4-7 : G100



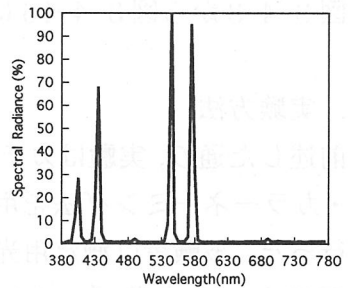
☒ 3-4-8 : G80R20



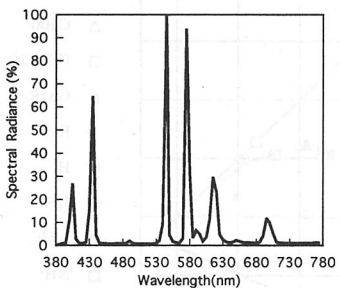
☒ 3-4-9 : G55R45



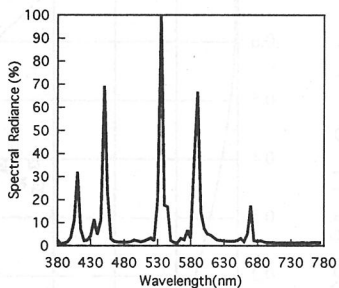
☒ 3-4-10 : R100



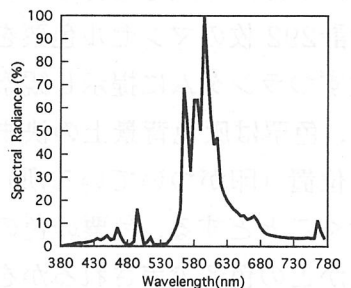
☒ 3-4-11 : H



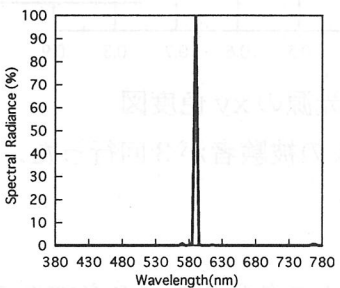
☒ 3-4-12 : HF



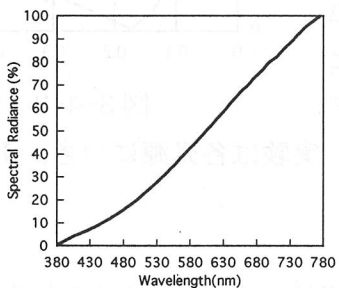
☒ 3-4-13 : MHL



☒ 3-4-14 : NH



☒ 3-4-15 : NX



☒ 3-4-16 : IL

3.4.3 結果

各々の光源下において、3人の被験者の3回の応答が同じ色名で一致していたものを図3-4-17から図3-4-24に示した。ここに示さなかった光源についてはD65と同様の傾向を示した。これらの図から見られる傾向を以下にまとめる。

- ・ 2波長域蛍光ランプではG80R20, G55R45は、わりとD65に近い結果が得られた。また、G100では他の光源より少し“緑”のカテゴリーが広いことを除けば、D65とほぼ似た結果であった。
- ・ R100になると、“赤”のカテゴリーがほとんどなく、かわりに“橙”のカテゴリーが広がっている。また、他の光源と比べて“緑”のカテゴリーが狭くなっている。
- ・ 水銀灯では“赤”のカテゴリーがほとんどなく、かわりに“紫”のカテゴリーが増大している。
- ・ 高圧ナトリウム灯では“桃”のカテゴリーが少し狭く、“橙”のカテゴリーが広がっている。
- ・ 低圧ナトリウム灯では、11の色名のうち応答のなかった色名が多くあった。高バリューの色票はほとんど“黄”という応答で、それ以外のバリューについては被験者間で安定した色名はなかった。低バリューの色票については被験者によって応答した色名に差が見られたが、どの被験者もほとんど色の判断が行えてないことは一致している。

その他の光源について

- ・ 3波長域蛍光ランプ(EX-L, EX-N, W)では、D65とほぼ似たような結果が得られた。
- ・ HIDランプの蛍光水銀灯、メタルハイドランプではD65と似た分布をしていた。

(矢口博久)

参考文献

- 1) B.Berlin and P. Kay, 『Basic Color Terms† Their Universality and Evolution, University of California Press(1969).
- 2) 清水正則・坂本正悦・武内徹二, 『2波長域発行形蛍光ランプ†, National Technical Report Vol.43 No.2, April. (1997)

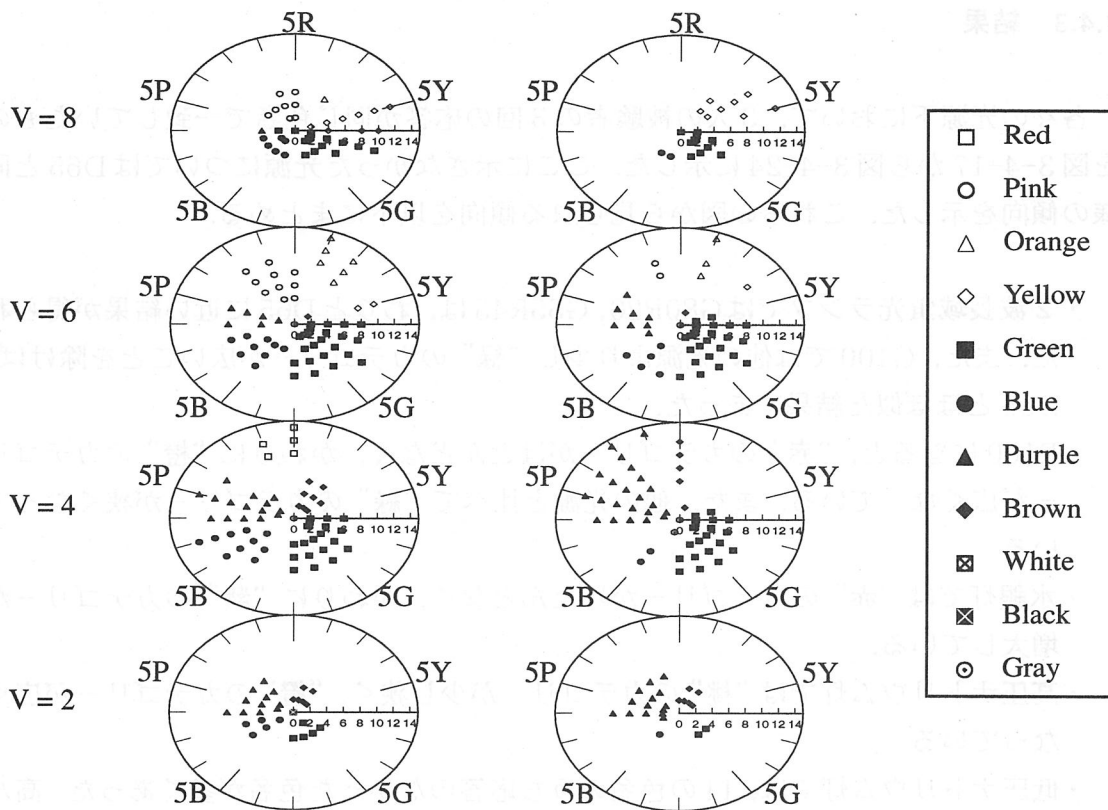


图 3-4-17 : D65

图 3-4-18 : H

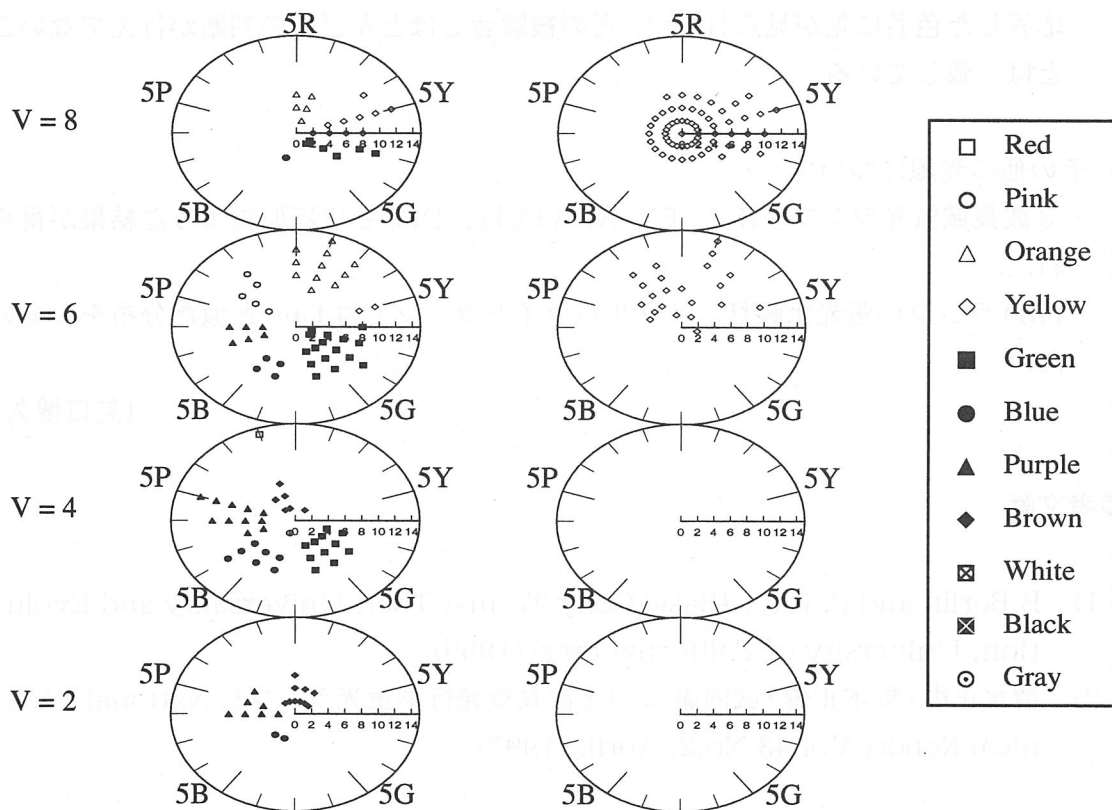


图 3-4-19 : NH

图 3-4-20 : NX

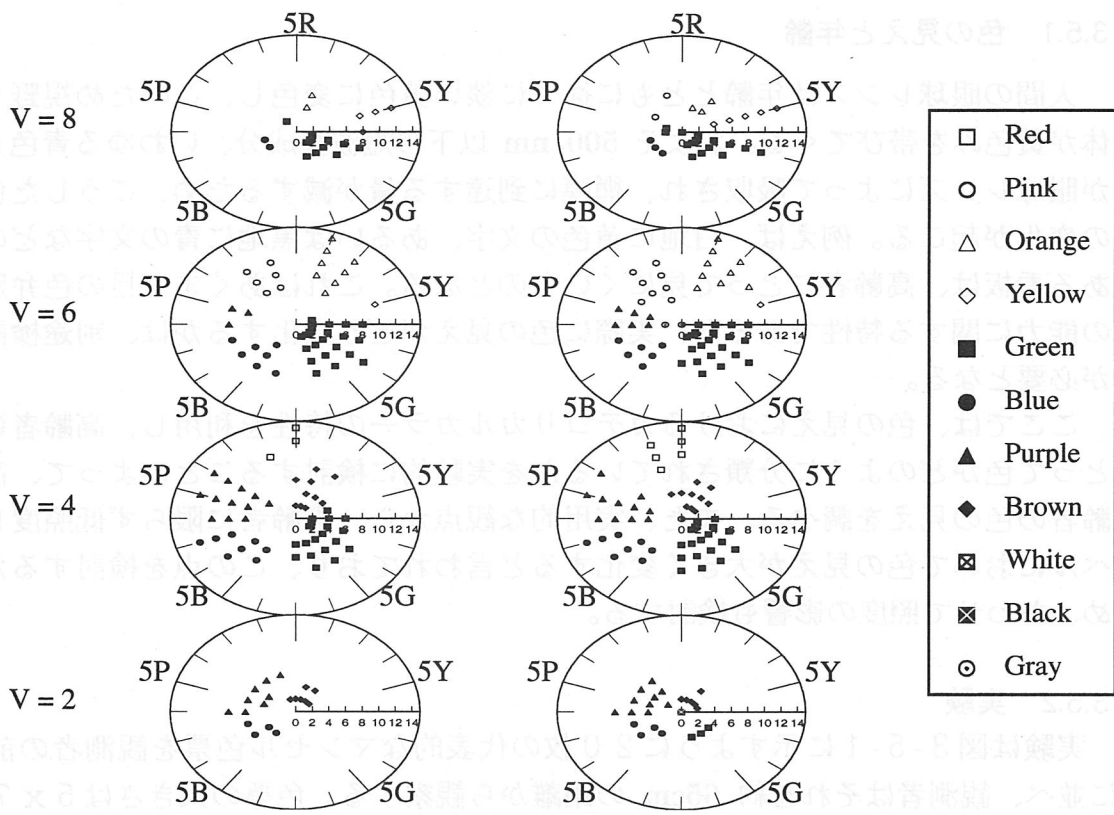


图 3-4-21 : G100

图 3-4-22 : G80R20

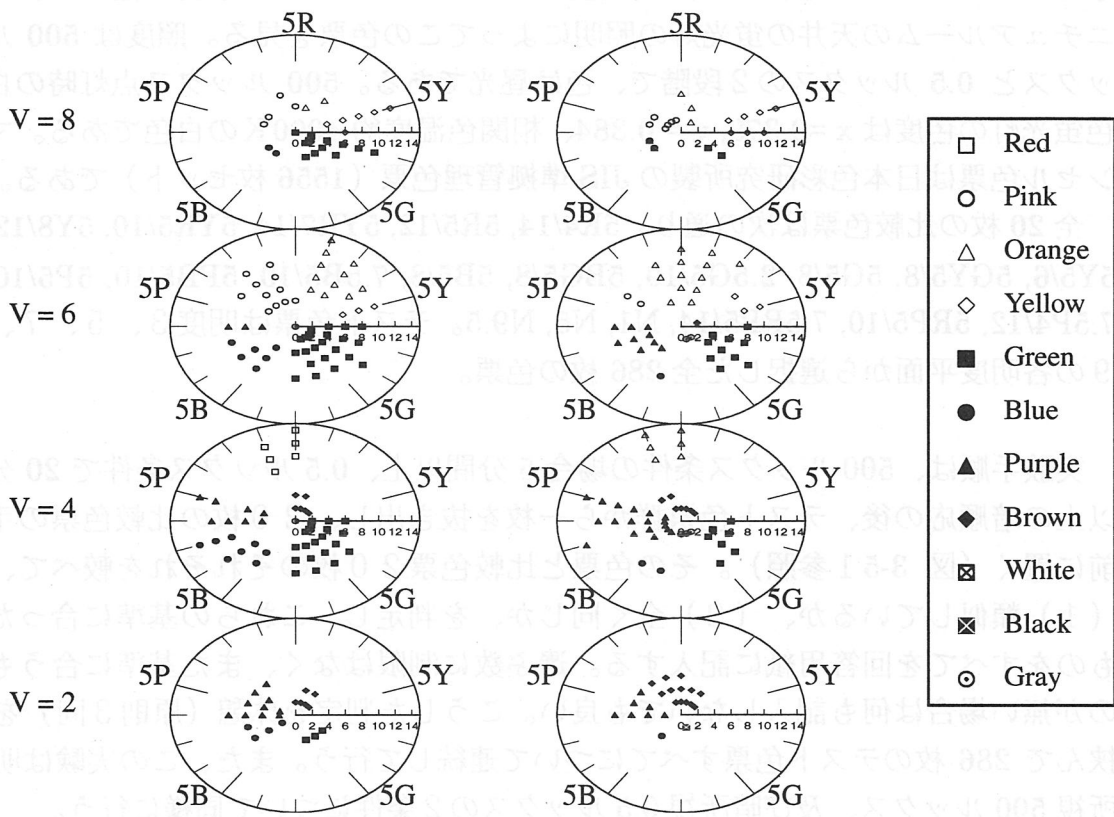


图 3-4-23:G55R45

图 3-4-24 : R100

3.5 観察者の年齢と照度による影響

3.5.1 色の見えと年齢

人間の眼球レンズは年齢とともに徐々に淡い黄色に変色し、このため視野全体が黄色みを帯びてくる。およそ 500 nm 以下の短波長成分、いわゆる青色光が眼球レンズによって吸収され、網膜に到達する量が減るため、こうした色の変化が起こる。例えば、白地に黄色の文字、あるいは黒地に青の文字などのある看板は、高齢者にとって見にくいものとなる。これはあくまで目の色弁別能力に関する特性であるが、実際に色の見えがどう変化するかは、別途検討が必要となる。

ここでは、色の見えにおけるカテゴリカルカラーの特性を利用し、高齢者にとって色がどのように分類されているかを実験的に検討することによって、高齢者の色の見えを調べる。また、実用的な観点から、高齢者に限らず低照度レベルにおいて色の見えが大きく変化すると言われており、この点を検討するため、あわせて照度の影響も検討する。

3.5.2 実験

実験は図 3-5-1 に示すように 20 枚の代表的なマンセル色票を観測者の前に並べ、観測者はそれを約 65cm の距離から観察する。色票の大きさは $5 \times 7 \text{ cm}^2$ (観測者に向かって縦置き) で、これは視角 4.4×6.1 度に対応する。色票はリビングルームを模した照明可変のミニチュアルームの床面に置かれ、ミニチュアルームの天井の蛍光灯の照明によってこの色票を見る。照度は 500 ルックスと 0.5 ルックスの 2 段階で、色は昼光である。500 ルックス点灯時の白色蛍光灯の色度は $x = 0.379$, $y = 0.384$ 、相関色温度約 4000K の白色である。マンセル色票は日本色彩研究所製の JIS 準拠管理色票 (1556 枚セット) である。

全 20 枚の比較色票は次の通り。5R4/14, 5R5/12, 5YR7/14, 5YR5/10, 5Y8/12, 5Y5/6, 5GY5/8, 5G5/8, 2.5G5/10, 5BG5/8, 5B5/8, 7.5B5/10, 5PB5/10, 5P5/10, 7.5P4/12, 5RP5/10, 7.5RP5/14, N1, N5, N9.5。テスト色票は明度 3、5、7、9 の各明度平面から選択した全 286 枚の色票。

実験手順は、500 ルックス条件の場合 5 分間以上、0.5 ルックス条件で 20 分以上の暗順応の後、テスト色票群から一枚を抜き出し、20 枚の比較色票の手前に置く (図 3-5-1 参照)。その色票と比較色票 20 枚のそれぞれを較べて、(1) 類似しているか、(2) 全く同じか、を判定し、これらの基準に合ったものをすべてを回答用紙に記入する。選ぶ数に制限はなく、また基準に合うものが無い場合は何も記入しないでも良い。こうした判定を休憩 (原則 3 回) を挟んで 286 枚のテスト色票すべてについて連続して行う。また、この実験は明所視 500 ルックス、及び暗所視 0.5 ルックスの 2 条件について同様に行う。

観測者は若年者（18-26才）44名、高齢者（60-76才）45名の計89名。そのうち若年者の6名、及び高齢者の5名については繰り返し2回の実験を行った。すなわち若年者、高齢者とも延べ50名、計100名の結果が得られた。

得られたデータは、各比較色票ごとに、それぞれについて類似と判定された確率マップ（マンセル表色系上）として整理する。比較色票に色が近いものは類似と判定される確率が高く、離れているものほど確率が低くなる。各比較色票について10%選択の確率（低類似度）、30%選択の確率（中類似度）、50%選択の確率（高類似度）、及び同じ（同じ判定10%選択）と判定したそれぞれについての等高線をマンセル色票上に描く。

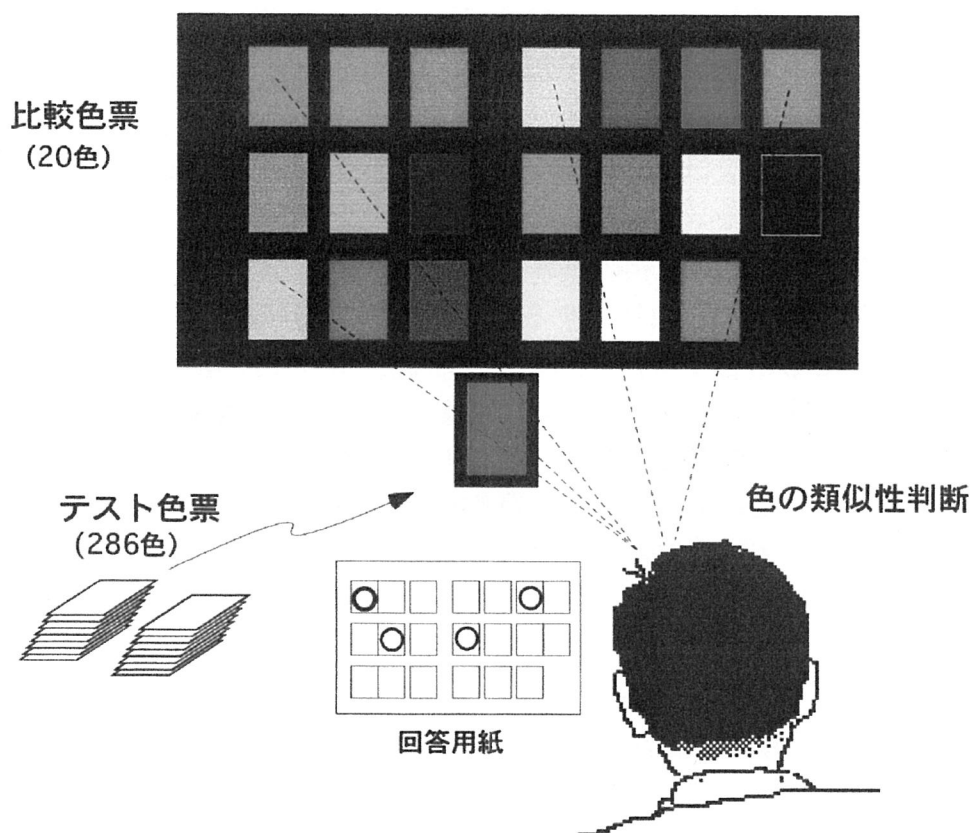


図 3-5-1 : 実験方法

3.5.3 結果と考察

結果の一例として、図 3-5-2 に 500 ルックスにおける 5R5/12 (赤) 及び 5G5/8 (緑) の比較色における類似度 10、30、50%の等高線を示す。細い実線の輪郭で色の塗りつぶされて領域は 10%の選択率で色が類似していると判定された領域で、比較的緩い基準。次に太い実線は 30%の確率の類似度で輪郭のみの表記である。さらに最も太い実線は 50%の選択率を有する類似度でかなり似ていると判断された色である。斜線の領域は全く同じ色と判定された領域で、もちろん非常に狭い領域に限られる。これらはすべて明度 5 (V=5) の平面の色においてであり、図中の小丸の点はテストとして使用した 286 枚の色の点を表す。

今回のテスト色は高彩度領域が制限されているので、高彩度の領域はあくまで推定であり、その意味で領域の端は点線で示した。また、この図には条件として高齢者及び若年者、明所視と薄明視の計 4 条件が示されている。

5R5/12 (赤) や 5G5/8 (緑) を見ると高齢者と若年者で本質的な違いは見られないが、高齢者がやや領域が狭くなっている。すなわち赤や緑と似ていると判定する色が高齢者は少ないことを意味する。薄明視になると、高齢者、若年者とも類似色の領域は広がり、特に 5G5/8 (緑) に対する領域は青の領域にまで広がっている。

各比較色のうちマンセル色相の基本となる 5R, 5RY, 5Y, 5YG, 5G, 5BG, 5B, 5PB, 5P, 5RP, 5N の各色相に対する 30%類似度の領域を示したものが図 3-5-3 である。ここでも、若年者、高齢者、明所視、暗所視の 4 条件で示す。各領域はそれぞれ色分けして示され、互いに重複する領域が存在するが、あくまで、2つの基準色に対して確率的に類似性が同等であることを示す。

高齢者と若年者の比較は、あまり本質的な差が見いだせないが、図 3-5-2 でも見られたように全体的に高齢者の類似度領域が狭くなり、高齢者は若年ほど基本色と似ているという色が少ない。一方、明所視、薄明視の条件差は大きく、その傾向として、橙や黄の色相は赤や紫の方向に、一方紫や赤紫は赤や橙の方向に類似領域が広がる。すなわち、暗くなると橙から赤紫の領域が同様な色の見えに近づいている様子がわかる。

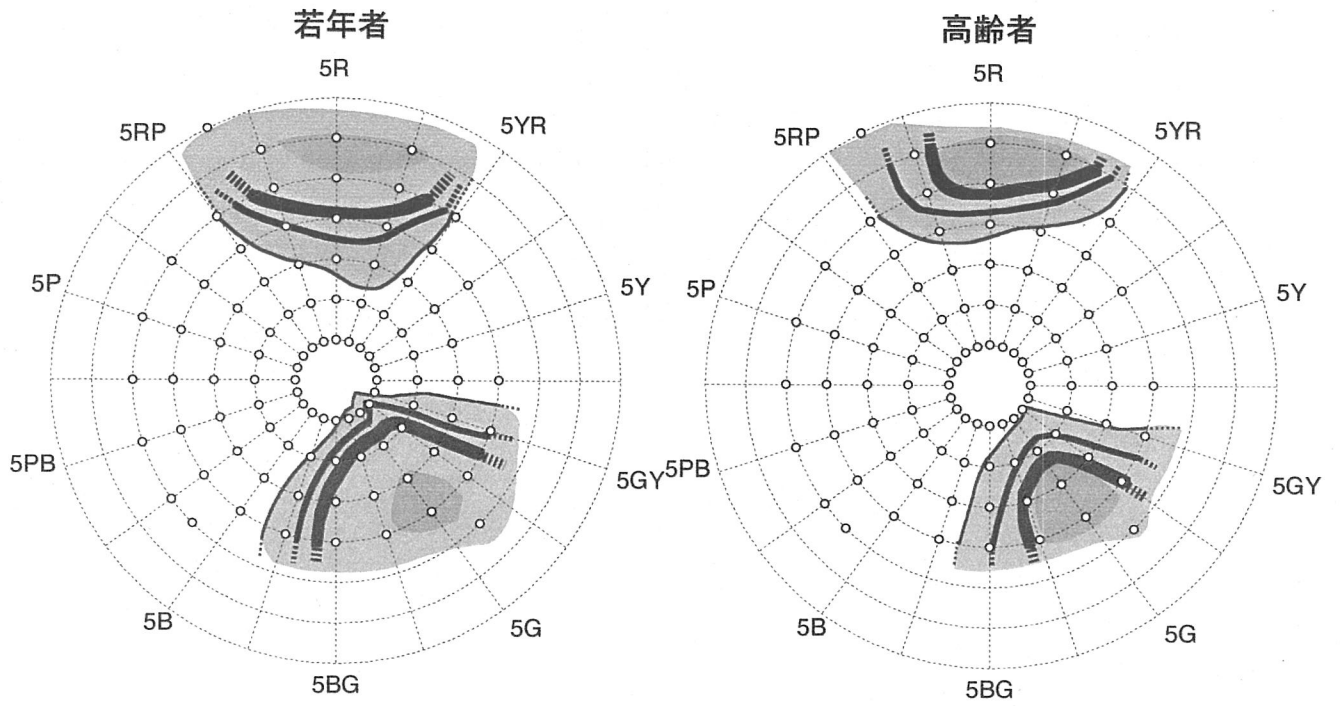
本データの活用として、視覚表示物等の色分けの際には、図 3-5-3 の重なるの無い領域内の色を選ぶことで、色の混同が避けられることになる。例えば、図 3-5-4 には、明所視及び薄明視においてそれぞれ若年者、及び高齢者のデータから 10%領域が互いに重ならない色を選んで示した。もちろん、このような色の組み合わせは他にもあり、ここで示した色の組みはあくまでサンプルである。このように 10%領域、30%領域、50%領域のそれぞれの類似領域から、それらが重ならない領域の色を選択することによって、混同のレベルを考慮した、見間違えの少ない視覚表示物の設計が可能となる。

3.5.4 まとめ

類似性判断を基準として、マンセル表色系上の代表色について類似する色彩の領域を定めた。この方法で、高齢者 50 名、若年者 50 名、それぞれ明所視 (500 ルックス) 薄明視 (0.5 ルックス) の条件について、類似色の領域を定めた。その結果、高齢者は若年者に比較して各代表色と類似する領域をやや狭く判定する傾向にあるが、本質的に領域に大きな差は見られなかった。一方、照度レベルの影響は、高齢者も若年者もともに大きく、紫—赤—橙—黄の系統と、緑—青の系統の大きく分けて 2 つのグループに集約する傾向が見られた。

(佐川 賢)

明所視 500lx



薄明視 0.5lx

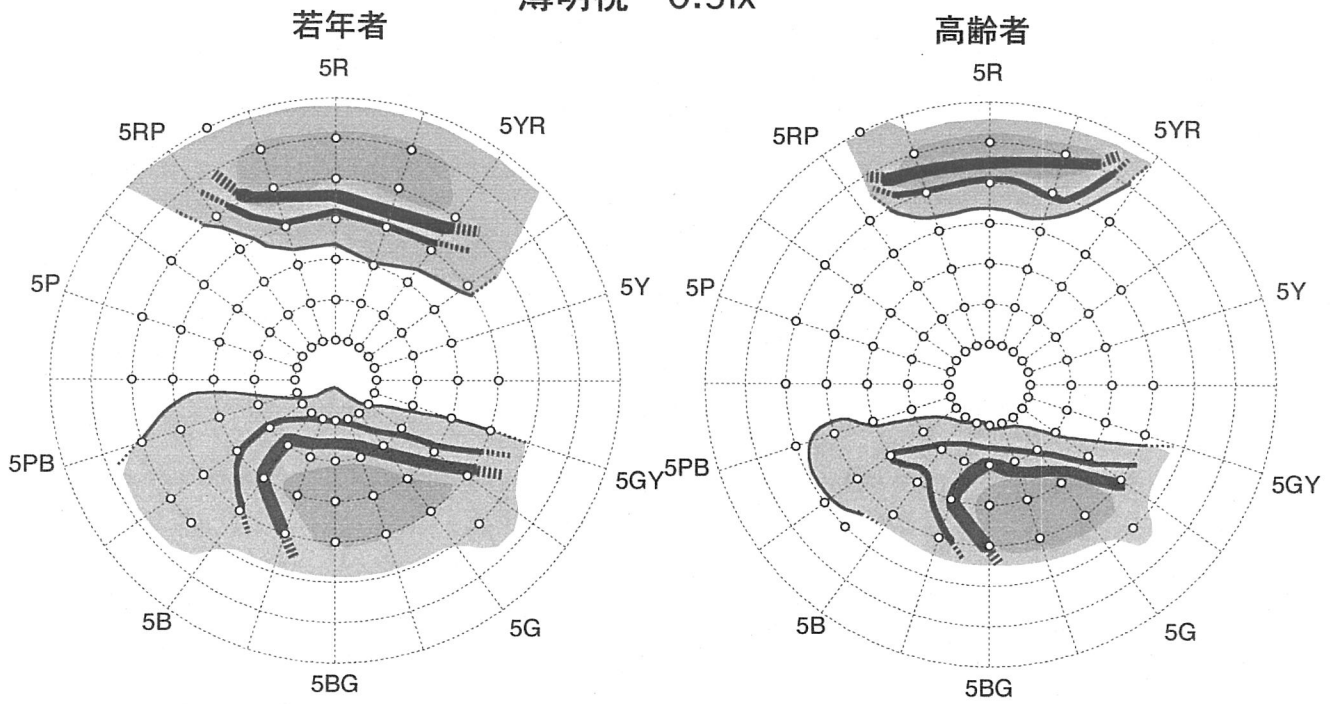
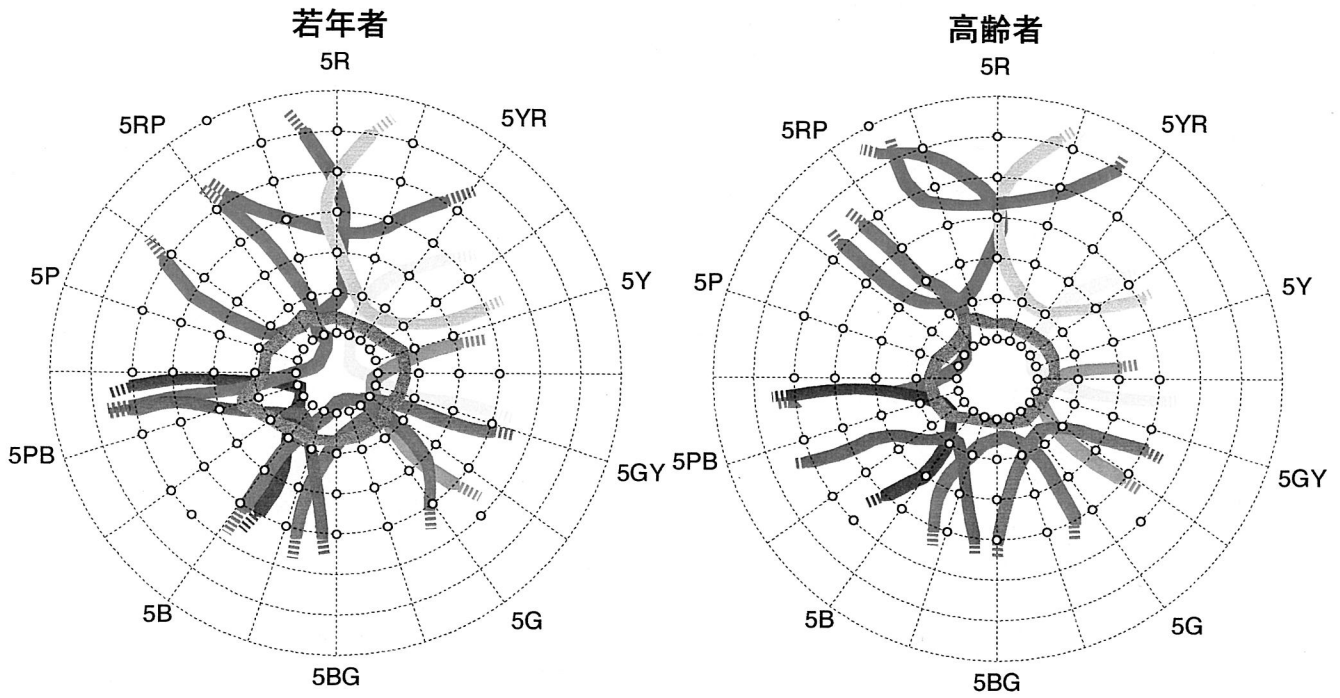
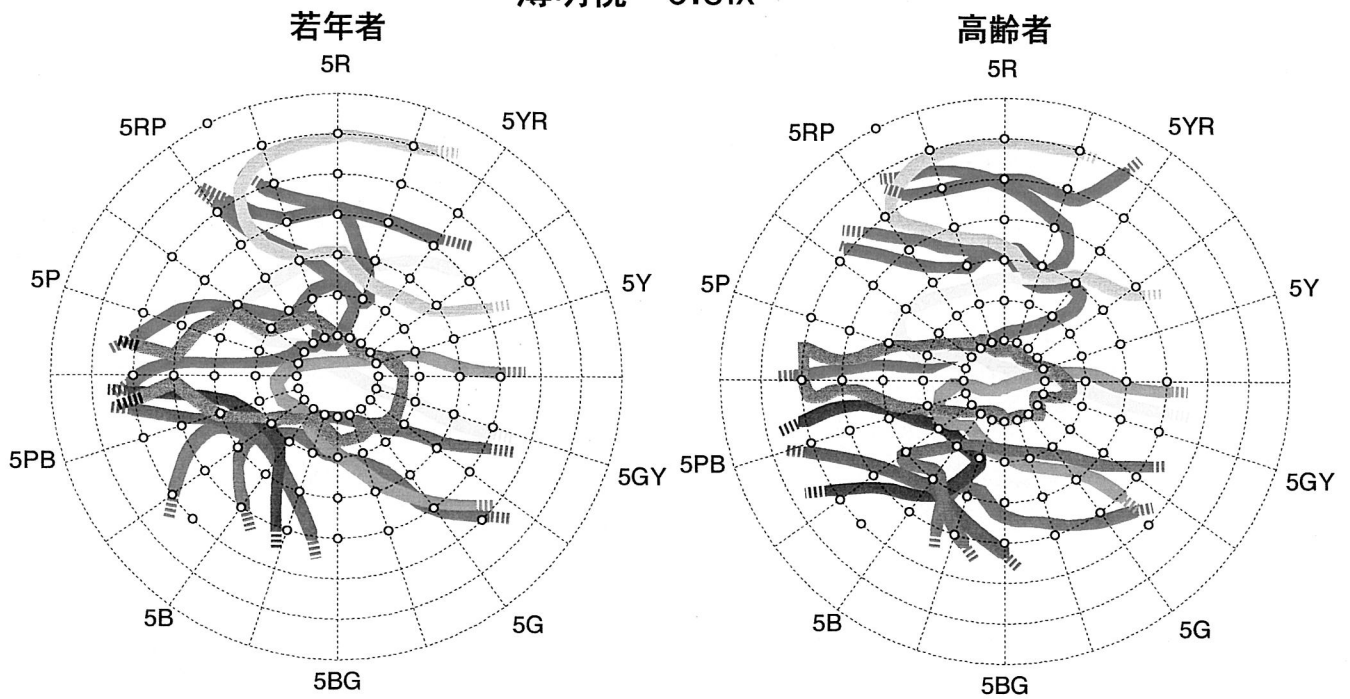


図 3-5-2 : 類似色領域のデータの例。赤(5R5/12)及び緑(5G5/8)の比較色に対するデータ。

明所視 500lx



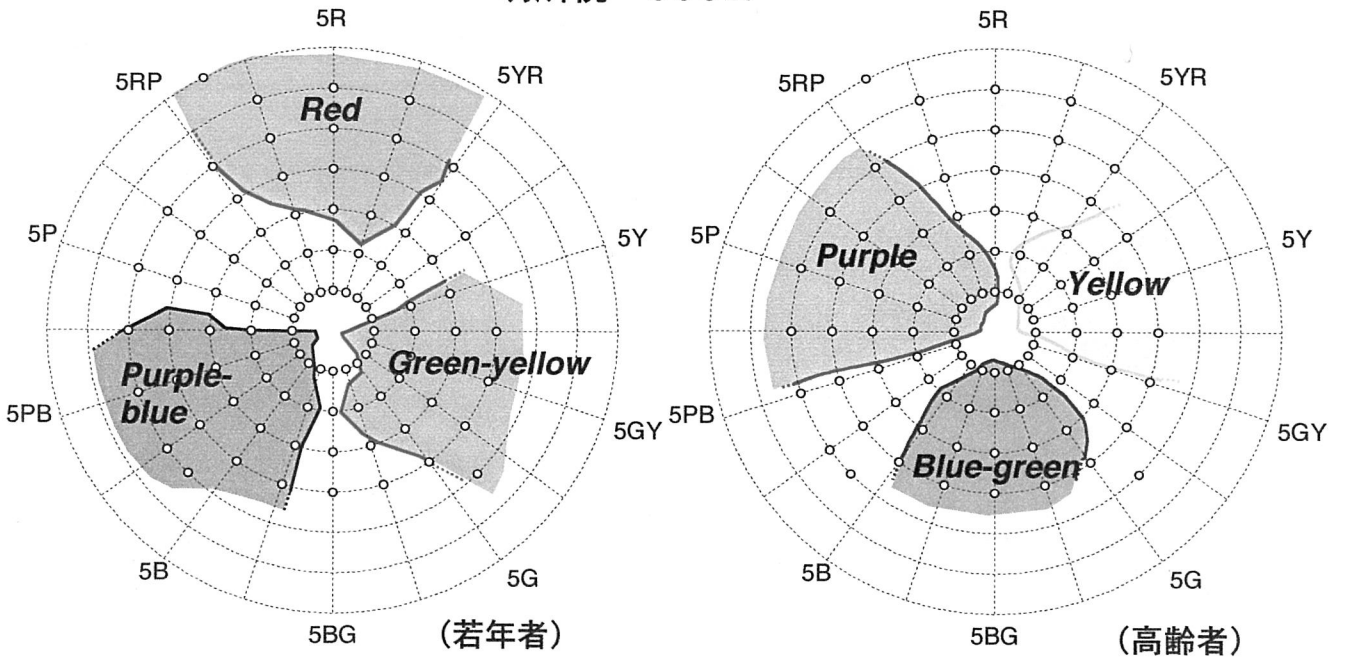
薄明視 0.5lx



- | | | | |
|--------|---------|-------|---------|
| 5R5/12 | 5YR5/10 | 5Y5/6 | 5GY5/8 |
| 5G5/8 | 5BG5/8 | 5B5/8 | 5PB5/10 |
| 5P5/10 | 5RP5/10 | N5 | |

図 3-5-3：基本色に対する 30%類似領域。高齢者，若年者，明所視，暗所視の条件に対するデータ。

明所視 500lx



薄明視 0.5lx

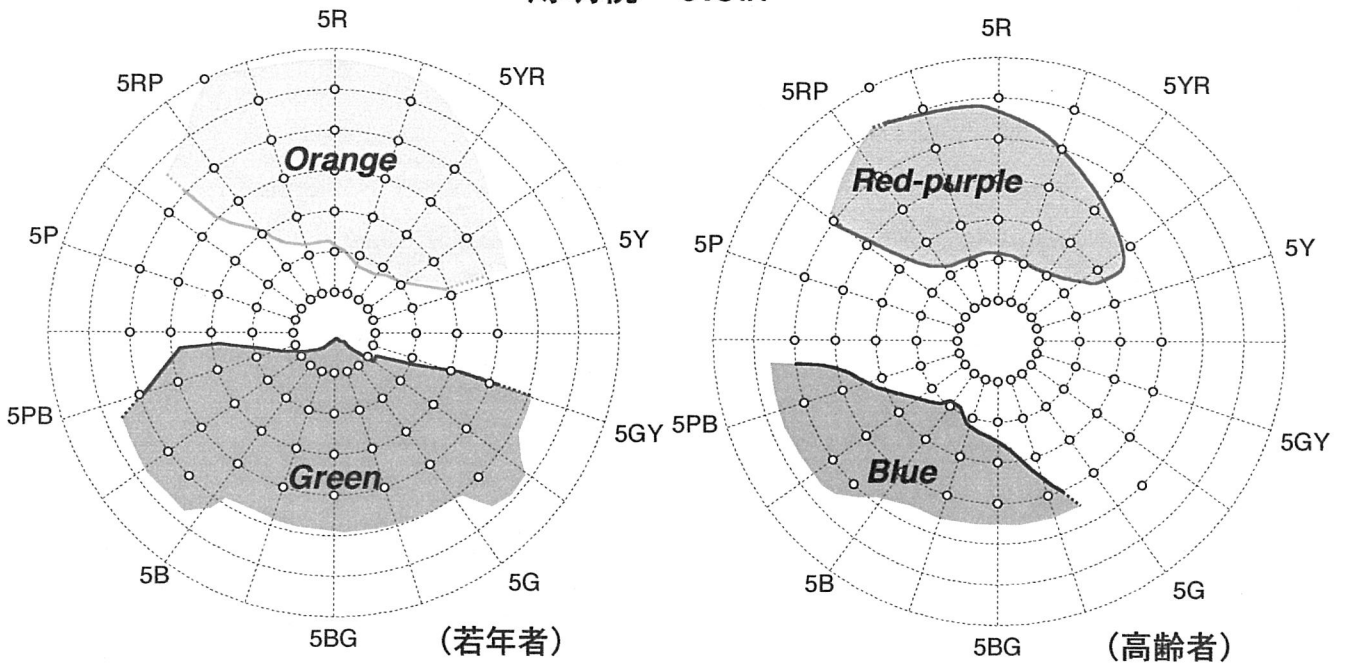


図 3-5-4：混同のない色彩の組み合わせの例

第4章 カテゴリカル色認識のモデル

4.1 CIECAM97s におけるカテゴリカル色知覚領域¹⁾

4.1.1 はじめに

3.4章では様々な光源による色の見えをマンセル表色系に示し、物体色の色名知覚は光源に依存することが示された。この章では、光源に依存しない色空間として色の見えモデルの色空間を用いて、色名応答を予測できることを示す。実験に用いた色の見えモデルは1997年に京都で行われたCIE TC1-34のミーティングで採択されたCIE Color Appearance Model 1997 Simple Version (CIECAM97s)¹⁾ というモデルである。

4.1.2 CIECAM97s の概要

CIECAM97s モデル²⁾では、入力データとして順応視野の輝度(単位 cd/m^2 、通常順応視野に置かれた白色の輝度の20%を用いる)、原条件におけるサンプルの相対三刺激値、原条件における原白色の相対三刺激値、原条件における原背景の相対輝度である。これに加えて、周辺の影響を表す係数、色誘導ファクター、明度コントラストファクタ、順応の度合いを表すファクタを入力データとする。全てのCIE三刺激値はCIE1931表色系の等色関数から求める。背景は対象とする刺激に隣接した領域とし、周辺は視野の残りの部分として定義する。対象とするシーンの中の白色の20%と同等あるいはそれ以上の周辺の相対輝度を「平均」とし、20%以下を「薄暗い」とし、約0%を「暗黒」と考える。これらの入力データを基に、まず、最初の色順応変換として原観察条件からの等エネルギー照明による観察条件での対応色への変換をする。まず、サンプルと白色の三刺激値を規格化して、錐体応答変換する。色順応変換はvon Kriesの順応モデルを修正したもので、短波長域チャンネルに指数関数の非線形性を導入したものである。さらに、順応の度合いを調節する。さらに、背景による誘導ファクタ、背景による明るさ誘導ファクタ、色による明るさ誘導ファクタを考慮し、非線形応答圧縮をほどこし、順応後の錐体応答を求める。この錐体応答からこのモデルの出力である色の見えの関数として、赤-緑、黄-青の反対色応答、無彩色応答、色相角、明度、明るさ、飽和度、クロマ、カラフルネスが得られる。

4.1.3 CIECAM97s における11基本色の領域

CIECAM97sの色空間における座標から11の基本色の領域を求めるため、実験で使った全ての光源の結果をまとめて表すことにした。ただ、CIECAM97sが単色光源に対応していないため、G100, R100, NXの3光源は除いて11光源を用いた。ここ

で全ての光源の結果をまとめて表すことには2つの理由がある。以下にその理由を示す。

1. 1つの光源で表すことができない領域の色カテゴリーを表すため。
2. 様々な光源による色名応答をCIECAM97sの色空間に一緒に示した時に、色カテゴリーの分布に重なりがなければ、この色空間が光源に依存せずに色名を予測できることが示せるため。

CIECAM97sで出力される色の見えの属性には絶対的な属性と相対的な属性がある。今回の実験では照度レベルの条件が1種類であり、幅広い照度レベルにおける色の見えを予測することを目的としていないため、絶対的な属性（明るさQ, カラフルネスM）は使わずに、相対的な属性（明度J, クロマC）を使い、色相については色相角hで結果を表した。

ここでは、3人の被験者の3回の応答が同じ色名で一致していたものをCIECAM97sのJCh色空間に示したものを図4-1-1に示す。この図からCIECAM97sの色空間に様々な光源の結果を一緒に示しても、それぞれの基本色の領域に重なりがほとんどないことが分かる。このことから、この色空間における座標から色名を特定することができると言える。

また、付録として図4-1-2から図4-1-5に3.4章に示した各光源の色名応答の結果をCIECAM97sのJCh色空間にのせたものを示す。

(矢口博久)

参考文献

- 1) H.Yaguchi, Y.Takahashi and S.Shioiri, Basic Categorical Colors in the CIECAM97s Space, Proceedings of AIC Medterm Meeting, pp.49-52 (1999)
- 2) M.R.Luo and R.W.G.Hunt, The Structure of the CIE 1997 Colour Appearance Model(CIECAM97s), Color Res. Appl., 23, 138-146(1998)

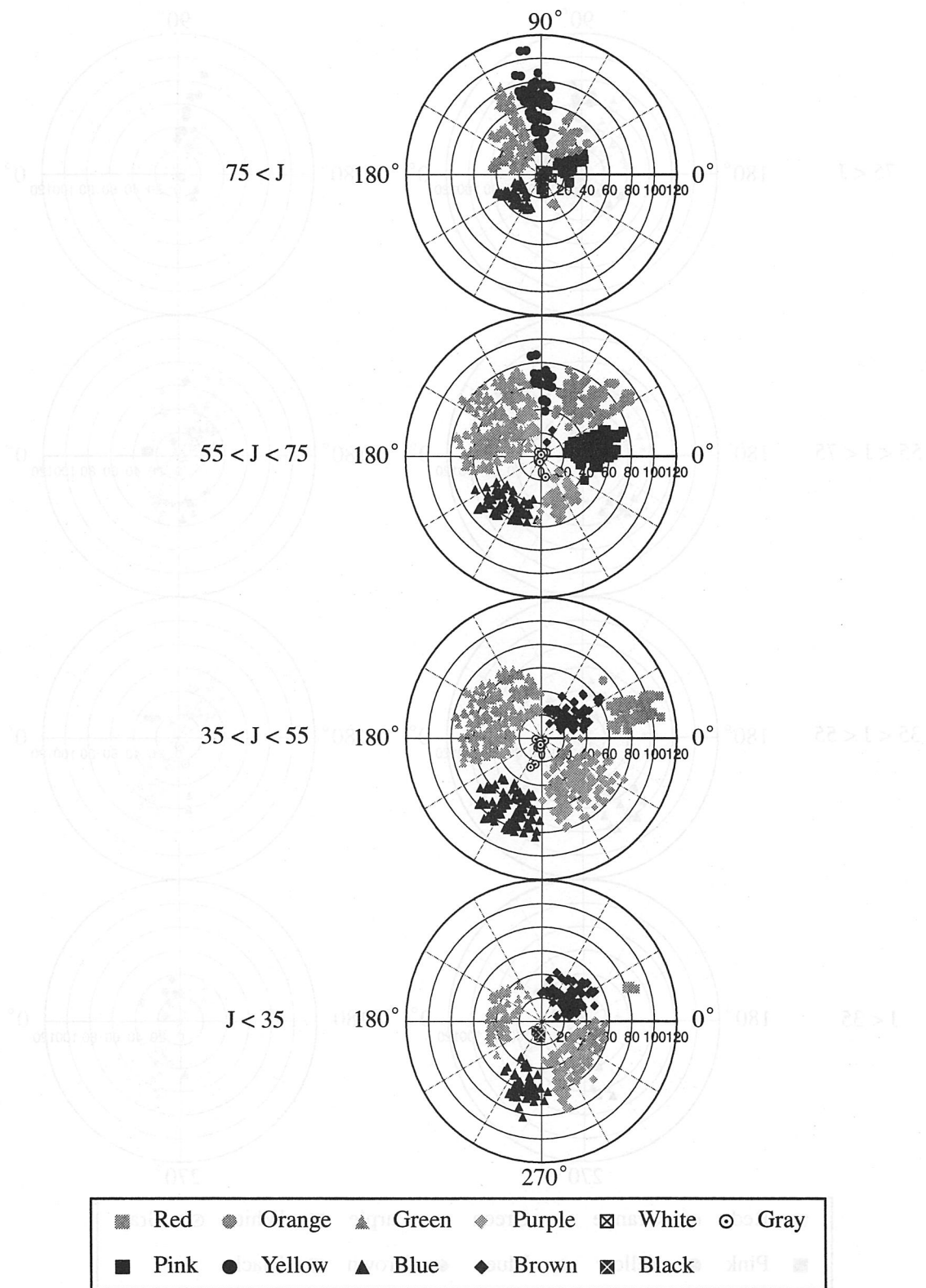


図 4-1-1 : CIECAM97s (J,C,h)色空間における色票の色の見え
G100, R100, NX 以外の光源のOR

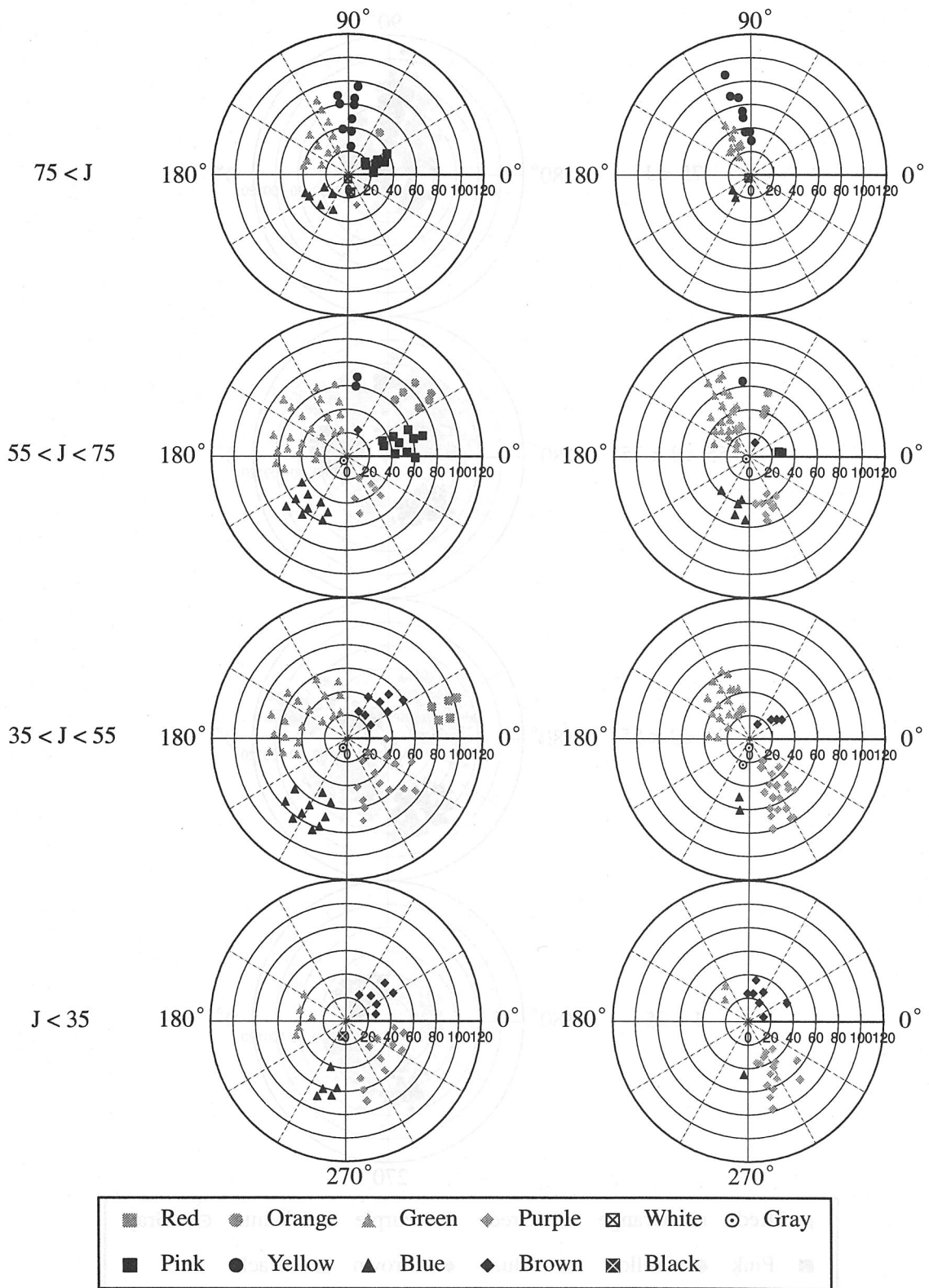


図4-1-2 : CIECAM97s (J,C,h)色空間における色票の色の見え
D65 (左), H (右)

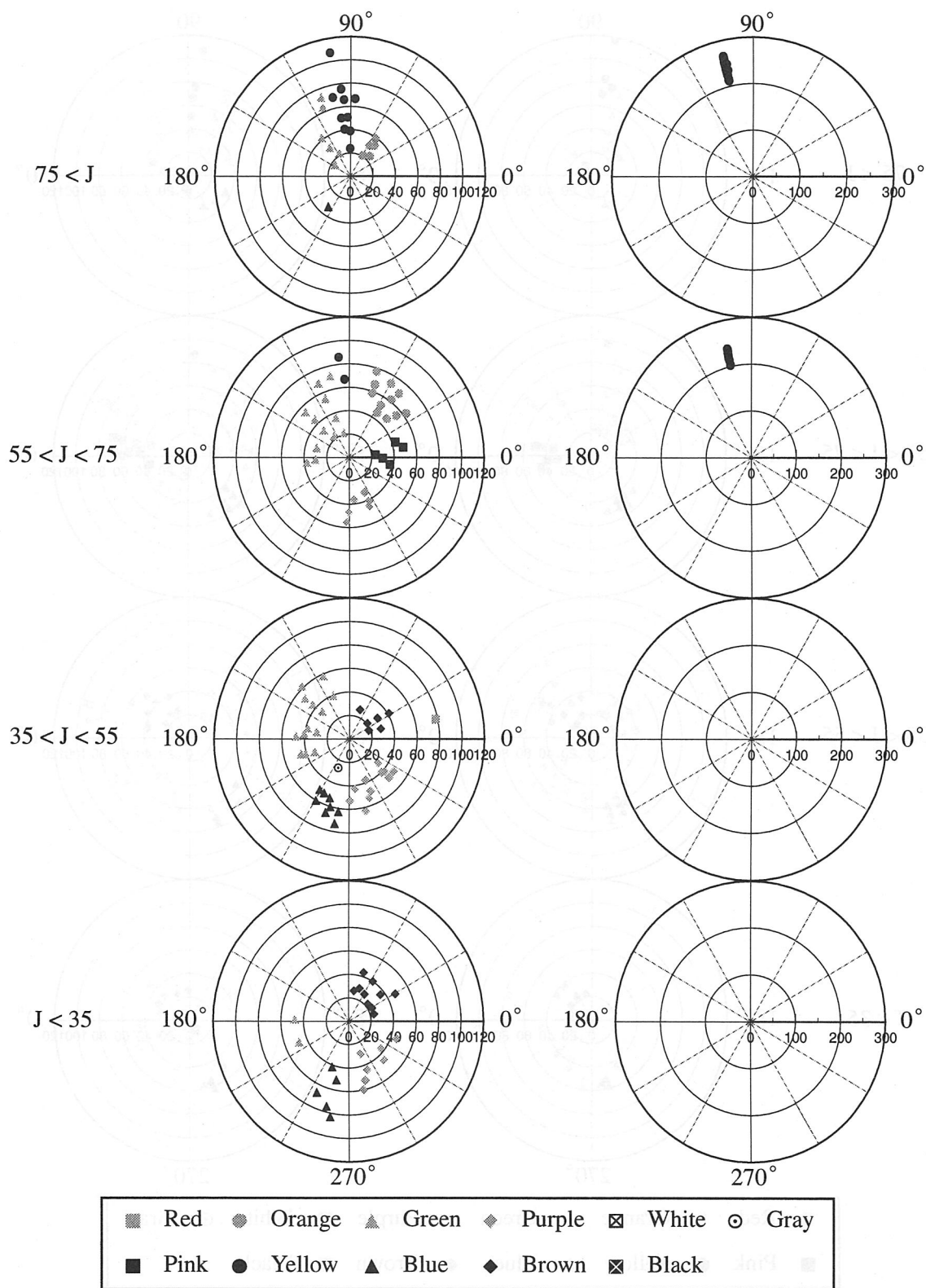


図 4-1-3 : CIECAM97s (J,C,h)色空間における色票の色の見え
NH (左), NX (右)

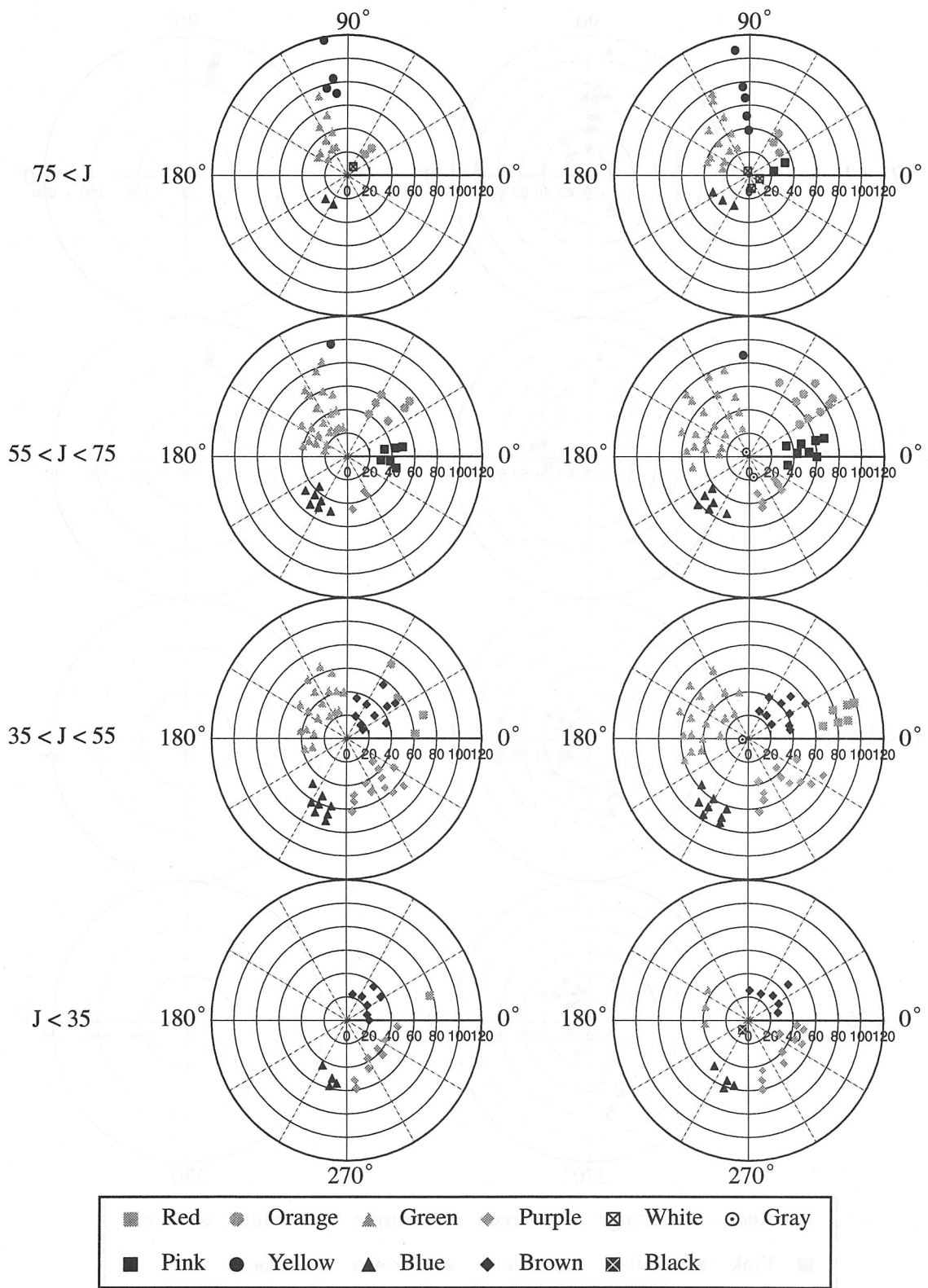


図 4-1-4 : CIECAM97s (J,C,h)色空間における色票の色の見え
G100 (左), G80R20 (右)

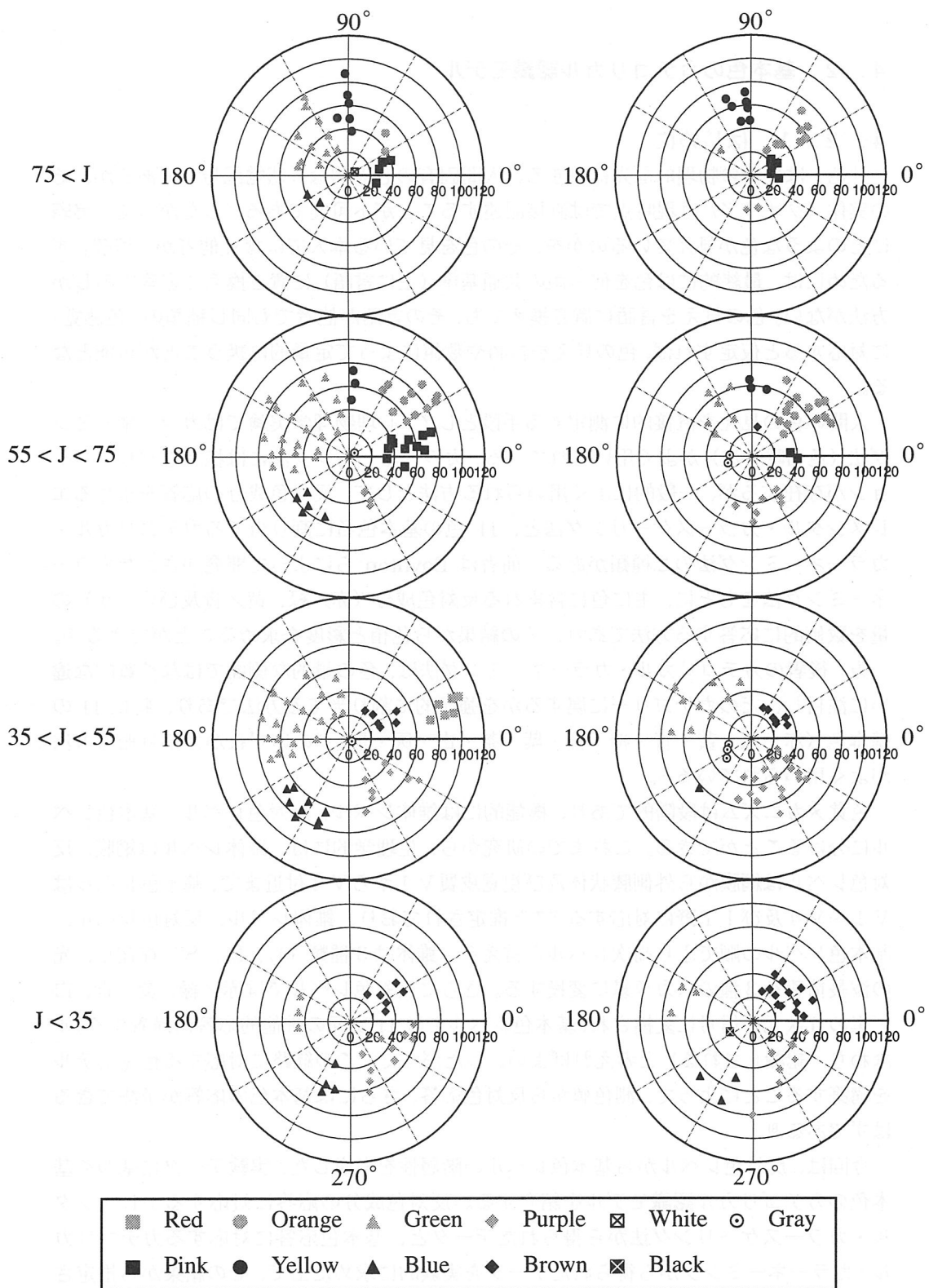


図4-1-5 : CIECAM97s (J,C,h)色空間における色票の色の見え
G55R45 (左), R100 (右)

4. 2 基本色のカテゴリカル認識モデル

4. 2. 1 はじめに

「色」は外界の物理的な光に対する、人間固有の心理的な「感覚記号」であるが、その実体（クオリア）は現時点では直接記述することが不可能である。したがって、実際にどのような色が見えているのかを、その色を見ている本人ではなく他者が「理解」するためには、最終的には色を何らかの共通基準（主に言語）に置き換えて応答するしか方法がない。色の見えを言語に置き換えても、その言語が他者でも同じ種類の「色感覚」に対応すると仮定すれば、色の見えを言語や数値によって定量的に扱うことが可能となる。

人間の色の見えを直接的に測定する手段として、心理物理学実験ではカラーネーミング法（色名呼称法）がよく用いられている。カラーネーミング法には様々なバリエーションが存在するが、一般的によく用いられる方法として、反対色成分の応答を求めるエレメンタル・カラースケーリング法と、11色の基本色名に割り当てるカテゴリカル・カラーネーミング法の2種類がある。前者は Boynton らによって開発されたカラーネーミング法をもとに、主に色に含まれる反対色成分（赤／緑、黄／青及び白／黒）の量を数値的に応答する方法であり、その結果から色相と彩度を求めることができる²⁾。一方、後者のカテゴリカル・カラーネーミング法は、色の量的な側面ではなく質的な違いに注目し、どのカテゴリに属するかを強制的に割り当てる方法であり、特に11の基本色（赤・緑・黄・青・橙・桃・紫・茶・白・灰・黒）³⁾のいずれかに割り振る方法がよく用いられている⁴⁾。

色覚メカニズムは段階的であり、機能的には錐体レベル、反対色レベル、基本色レベルに分けることができる。これまでの研究から、生理学的には、錐体レベルは網膜、反対色レベルは網膜から外側膝状体及び視覚皮質V1からV4付近まで、基本色レベルはV1～V4及びIT野に対応する⁵⁾と推定されており、錐体レベル、反対色レベル、基本色レベルの順でより高次レベルと言える。錐体は3種類（L、M、S）存在し、光の波長情報を3種のスカラ量に変換する。さらに反対色レベルでは赤／緑、黄／青、白／黒の6次元の信号に変換され、基本色レベルでは11次元の排他的応答に帰着する（すなわち「認識」される）と考えればよい。したがって、この経路に対応する色覚モデルを構築することによって、測色値から反対色応答、さらには基本色の応答が予測できるはずである⁶⁾。

今回は、反対色レベルから基本色レベルの階層性を考慮した、実験データに基づく基本色のカテゴリカル認識モデルを紹介する。反対色成分の応答に対応するエレメンタル・カラースケーリング法から得られたデータと、基本色応答に対応するカテゴリカル・カラーネーミング法から得られたデータを実験的に求めた上で、その結果から推定された基本色のカテゴリカル認識モデルを構築した。本モデルは、比較的シンプルな積算回路を有するネットワークモデルであるが、光源色モードや物体色モード等の見えのモ

ードにかかわらず、基本色の応答を反対色応答から統一的に精度良く予測できることを示す。

4. 2. 2 実験方法

刺激色光は、カナダ国立研究所(NRC)のスタイルズ型色彩計(原色:赤(645.2nm)、緑(526.3nm)、青(444.4nm))で呈示した。テスト刺激には、網膜照度 100 Td、視角サイズ 2 deg の xy 色度図内の 78 色を用いた(図4-2-1)。また、周辺刺激として、視角サイズ 10 deg の白色光($x=0.317, y=0.349$)を用いた。周辺刺激強度条件は 3 種類設定し、網膜照度 0 Td(周辺なし条件)、200 Td(低照度周辺条件)、1456 Td(高照度周辺条件)の 3 レベルとした。“周辺なし条件”では、すべてのテスト色光は「光源色モード」として知覚され、“高照度周辺条件”では、すべてのテスト色光は「物体色モード」に知覚された。また、“低照度周辺条件”では、ほとんどのテスト色光が光源色と物体色の中間のモードで知覚された(色光の明るさによってモードは異なるため、あくまでも平均としての設定。今回はこれを「半物体色モード」と呼ぶ)。被験者は、KO, GHF の男性 2 名で、共に色覚正常である。

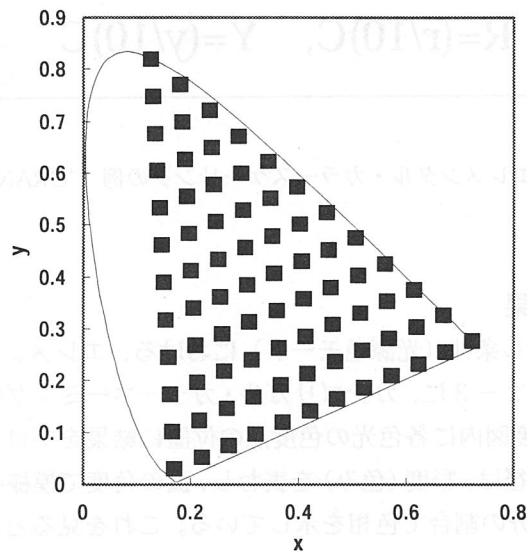


図4-2-1 テスト刺激78色の各xy色度

被験者は、ランダムな順序で呈示される色光に対して、エレメンタル・カラースケーリングとカテゴリカル・カラーネーミングを続けて行なった。エレメンタル・カラースケーリングでは、白み(W) + 黒み(Blk) + 色み(C) = 10 になるようにそれぞれの量(比)を応答し、さらに $red(r) + green(g) + yellow(y) + blue(b) = 10$ になるように色成分の内容についても応答した。全体に対する各色成分の値は、例えば赤成分の場合

であれば、 $\text{Red}=(r/10)*C$ で求まる（図4-2-2）。以下の結果は各3セッションの平均値で示す。また、カテゴリカル・カラーネーミングでは、11の基本色（RED, GREEN, YELLOW, BLUE, WHITE, ORANGE, PINK, PURPLE, BROWN, GRAY, BLACK）の中から1つの色名を強制的に選択した。3セッションとも同じ色名を応答したものだけを抽出し、結果として示す。

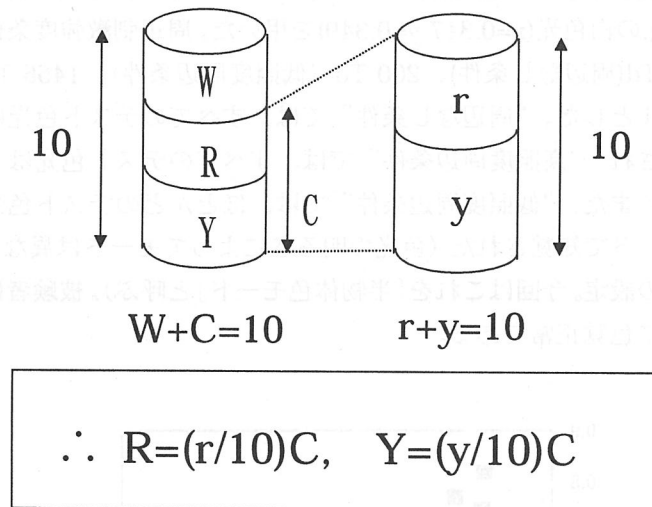


図4-2-2 エレメンタル・カラースケーリングの例（"ORANGE"の場合）

4. 2. 3 実験結果

被験者 KO の周辺なし条件（光源色モード）における、エレメンタル・カラースケーリングの結果を図4-2-3に、カテゴリカル・カラーネーミングの結果を図4-2-4に示す。共に xy 色度図内に各色光の色度点の位置に結果をプロットしてある。図4-2-3の各小円の半径は、彩度（色み）を表わし、弧の角度で模様（濃い順に青成分、赤成分、緑成分、黄成分の割合で色相を示している。これを見ると、白色点付近では円の大きさが小さく、外側にいく程大きくなる（すなわち彩度が高くなる）ことを示している。また、場所によって各色成分の割合が変化しているが、反対色説（赤と緑、黄と青は共存しない拮抗色）がほぼ成立していることを示している。また、図4-2-4は光源色モードにおける基本色の分布を表わしており、シンボルは3回の色名応答が同じだったものだけをプロットしたものである。シンボルが抜けている部分のほとんどは、各基本色領域の境界に位置しており、範疇化が曖昧な色（どちらとも言える色）が存在することを示唆している。また、光源色モードの結果のため、黒色や灰色及び茶色の基本色の領域が存在していないことも分かる。

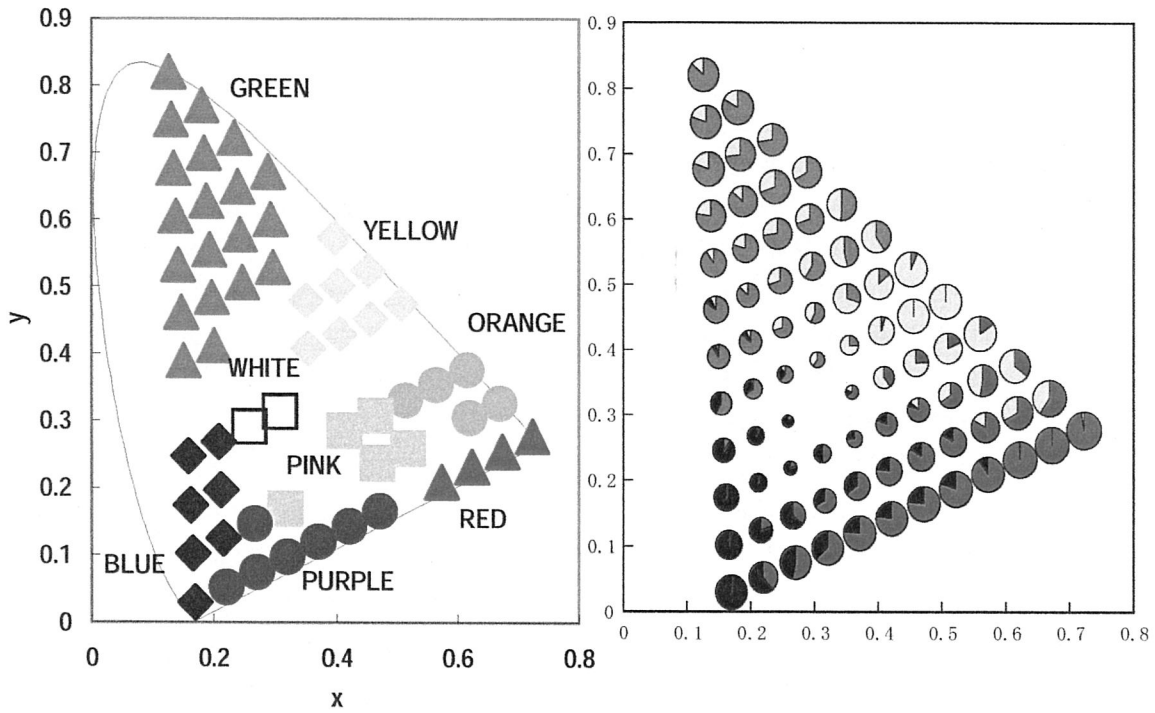


図4-2-3 被験者 KO の周辺なし条件での
エレメンタル・カラースケーリ
ングの結果

図4-2-4 被験者 KO の周辺なし条件での
カテゴリカル・カラーネーミ
ングの結果

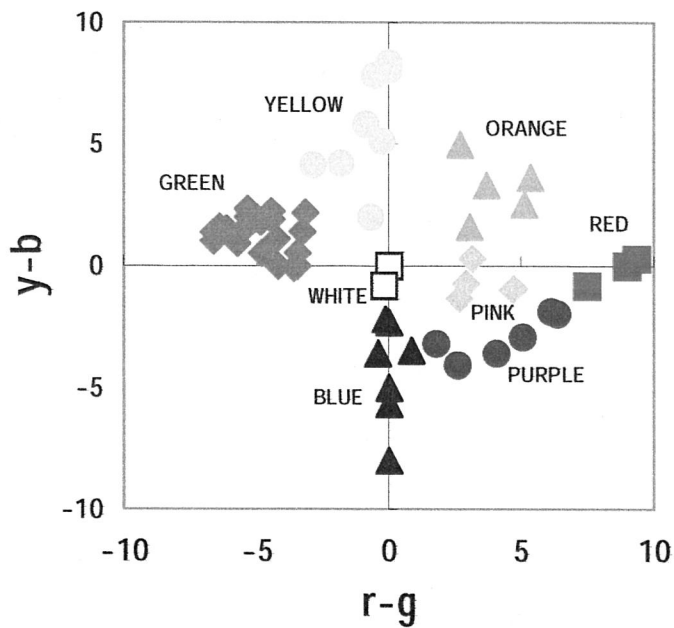


図4-2-5 光源色モードにおける反対色と基本色の関係 (被験者 KO)

エレメンタル・カラースケーリングの結果とカテゴリカル・カラーネーミングの結果の関係を調べるために、反対色応答の平面に、基本色応答をリプロットしたのが図4-2-5である。横軸の正方向を Red, 負方向を Green, 縦軸の正方向を Yellow, 負方向を Blue とした。これを見ると、シンボルの領域は重なっていないため、反対色応答によって、基本色を一意的に決定できることが分かる。つまり、光源色モードの場合には、Red, Green, Yellow, Blue の応答によって、基本色の応答を定式化できることを示唆している。もう1人の被験者 GHF の結果も、分布の多少の違い（位置・大きさ）を除いて、定性的な傾向は KO の結果と同様であった。

図4-2-5を詳しく見ると、RED, GREEN, YELLOW, BLUE はそれぞれの軸上付近に分布しており、反対色成分の応答と直接対応していることを示唆している。PINK と RED は色相的には同じカテゴリであることから、その色名の違いは彩度の違いで表現（決定）できると考えられるが、PINK は RED と WHITE の複合色（注：ここでの「複合」とは、知覚的な複合という意味であり、物理的な加法混色ということではない）とみなすことができる。PURPLE と ORANGE はある特定の色相領域として表現（決定）することも可能であるが、PURPLE は RED と BLUE の複合色、ORANGE は RED と YELLOW の複合色と考えることもできる。

また、低照度周辺条件（半物体色モード）、ならびに高照度周辺条件（物体色モード）の結果の図はここでは省略するが、周辺なし条件と比べて、「1. エレメンタル・カラースケーリングにおいて、黒の応答が生じた。 2. 黒応答は低彩度の色光で相対的に大きい。3. カテゴリカル・カラーネーミングにおいて、灰色及び茶色の応答が生じた。その分、白、橙の応答が減少した。」という違いが見られた。また、図4-2-5のような反対色と基本色の関係は、灰色及び茶色を除いて光源色の場合とほぼ同様な結果であったが、灰色は白の領域と重なり、茶色は橙色の領域と重なった。このことは、物体色モードまで含めた場合、RED, GREEN, YELLOW, BLUE の反対色応答だけでは、基本色の応答を決定できないことを示している。そこで、黒成分を加えて考察した結果、灰色と白色、及び茶色と橙色も分離できることが分かった。したがって、光源色と物体色の基本色応答を決定するためには、RED, GREEN, YELLOW, BLUE の反対色応答に加えて、WHITE と BLACK の応答量も加味する必要があることが示されたわけである。

4. 2. 4 ネットワークモデル

エレメンタル・カラースケーリングから得られた反対色成分の応答から、カテゴリカル・カラースケーリングで得られた基本色の応答を求めることができる具体的なモデルを考える。まず、基本色の応答がどのように脳内で生じているのかを考えてみよう。例えば、カテゴリカル・カラーネーミングで被験者が「ORANGE」と応答する場合でも、「RED」や「YELLOW」の知覚は生じており（これはエレメンタル・カラースケーリングできることから明らか）、時には「BROWN」と答えるべきか迷ったりする場合もある。したがって、ある色を見た時、複数の基本色の知覚が同時に生じているが、被

験者はその中で最も強く感じる「基本色」をカテゴリカル・カラーネーミングの応答とされていると考えることができる。したがって、基本色の応答そのものは1次元のスカラ量であり、カテゴリカル・カラーネーミングの応答はその中の最大値であると仮定する。次に、反対色成分の応答は6次元 (Red, Green, Yellow, Blue, White, Black) の量であるのに対し、基本色の応答は11次元であることから、何らかの多対多 (今回は6対11) 写像を考える必要がある。基本色11のうち、(RED, GREEN, YELLOW, BLUE, WHITE, BLACK) は反対色成分と同じ名称である。基本色レベルは反対色レベルよりも高次レベルであることから、エレメンタル・カラースケーリング、すなわち反対色成分の応答も、基本色レベルの (RED, GREEN, YELLOW, BLUE, WHITE, BLACK) のユニット (細胞?) の応答に対応しているはずである。したがって、これらの基本色6次元は反対色6次元にそのまま対応しているものと仮定する。他の基本色、すなわち ORANGE, PURPLE, PINK, BROWN, GRAY の5次元は、反対色の6次元を合成して作る必要がある。図4-2-5から、ORANGEはRedとYellow、PURPLEはRedとBlue、PINKはRedとWhiteが同時に含まれている必要があることが分かる。また、低周辺光条件ならびに高周辺光条件の結果から、BROWNはRedとYellowとBlack、GRAYはWhiteとBlackが同時に含まれている必要があることが分かった。すなわち、

<u>基本色</u>	<u>反対色</u>
ORANGE	= Red AND Yellow
PURPLE	= Red AND Blue
PINK	= Red AND White
BROWN	= Red AND Yellow AND Black
GRAY	= White AND Black

の関係が成立すると仮定する。このような演算は、AND (積) 回路を使って定式化できる。例えば、基本色 ORANGE のユニット応答量は、反対色成分 Red と Yellow の積、

$$\text{ORANGE} = K_{\text{orange}}^{-1} \cdot \text{Red} \cdot \text{Yellow}$$

のような形で記述することができる。右辺が反対色成分の応答量、左辺が基本色ユニット応答を意味している。定数 K_{orange} は、この積ユニットのゲイン (あるいは減衰率) を (他のユニットと) 調整する働きを有する。この積演算は、数学的には一種のゲインコントロールと考えることもできる。すなわち、

$$\text{ORANGE} = g(\text{Red}) \cdot \text{Yellow}, \quad \text{where } g(\text{Red}) = K_{\text{orange}}^{-1} \cdot \text{Red}.$$

または

$$\text{ORANGE} = g'(\text{Yellow}) \cdot \text{Red}, \quad \text{where } g'(\text{Yellow}) = K_{\text{orange}}^{-1} \cdot \text{Yellow}.$$

で、関数 g あるいは g' が“ゲイン”となる。生理学的構造の観点からすれば、単なる積演算と考えるよりも、ゲインコントロール (すなわち重み付けの制御) と考える方が適切かと思われる。さて、全基本色ユニットの応答量の計算式をまとめて書くと、

RED	=	Red
GREEN	=	Green
YELLOW	=	Yellow
BLUE	=	Blue
WHITE	=	White
BLACK	=	Black
ORANGE	=	$K_{orange}^{-1} \cdot \text{Red} \cdot \text{Yellow}$
PURPLE	=	$K_{purple}^{-1} \cdot \text{Red} \cdot \text{Blue}$
PINK	=	$K_{pink}^{-1} \cdot \text{Red} \cdot \text{White}$
BROWN	=	$K_{brown}^{-1} \cdot \text{Red} \cdot \text{Yellow} \cdot \text{Black}$
GRAY	=	$K_{gray}^{-1} \cdot \text{White} \cdot \text{Black}$

となる。また、エレメンタルカレースケージングにおいて、有彩色成分と無彩色成分の比は簡単に求めることができたことから、「彩度」あるいは「色み」の情報が処理されていることを示唆している。そこで、無彩色(WHITE, GRAY, BLACK)がカテゴリカル・カラーネーミングで選択されるのは、色み(CHROMA)がある一定以下の場合であると仮定する。これは、実験結果における無彩色の応答が、色みが非常に小さい色光に限られていたことを考慮したものである。すなわち、有彩色成分が少しでも含まれていると、それを「有彩色」としてカテゴライズする特性があることを示している。今回は、色みを反対色成分の和、すなわち $\text{CHROMA} = \text{RED} + \text{GREEN} + \text{YELLOW} + \text{BLUE}$ （実際は反対色の性質から高々2項の和）とし、その閾値を THRE とする。したがって、CHROMA が THRE 以下の場合には、無彩色の応答量(WHITE, GRAY, BLACK)の最大値のものが選ばれるとした。すなわち、MAX を最大値選択関数とし、カテゴリカル・カラーネーミングの応答を ANS とすれば、

```

if (RED+GREEN+YELLOW+BLUE) ≥ THRE
then ANS=MAX(RED, GREEN, YELLOW, BLUE, ORANGE, PURPLE, PINK, BROWN)
else ANS=MAX(WHITE, GRAY, BLACK).

```

のような判定を行えばよいことになる。これは、一種の非線形変換を施していることに対応する。以上の内容をモデル化したものが図4-2-6である。図4-2-6をコンピュータ上にシミュレートし、各被験者毎にカテゴリカルカラーネーミングの結果が3回とも同じ応答をしたデータだけを全周辺条件で集計し、実験結果を最も良く説明できる6個の定数(K_{orange} , K_{purple} , K_{pink} , K_{brown} , K_{gray} , THRE)を0.1ステップの繰り返し計算で求めてみた。その結果、被験者 KO で 97.2% (=176/181)、被験者 GHF でも 90.7% (=167/184) の高い正答率で予測できることが示された。その時の各定数の値は次の通りであった。最適解を与える定数値が幅を持つ場合は、その中央値を採用した。

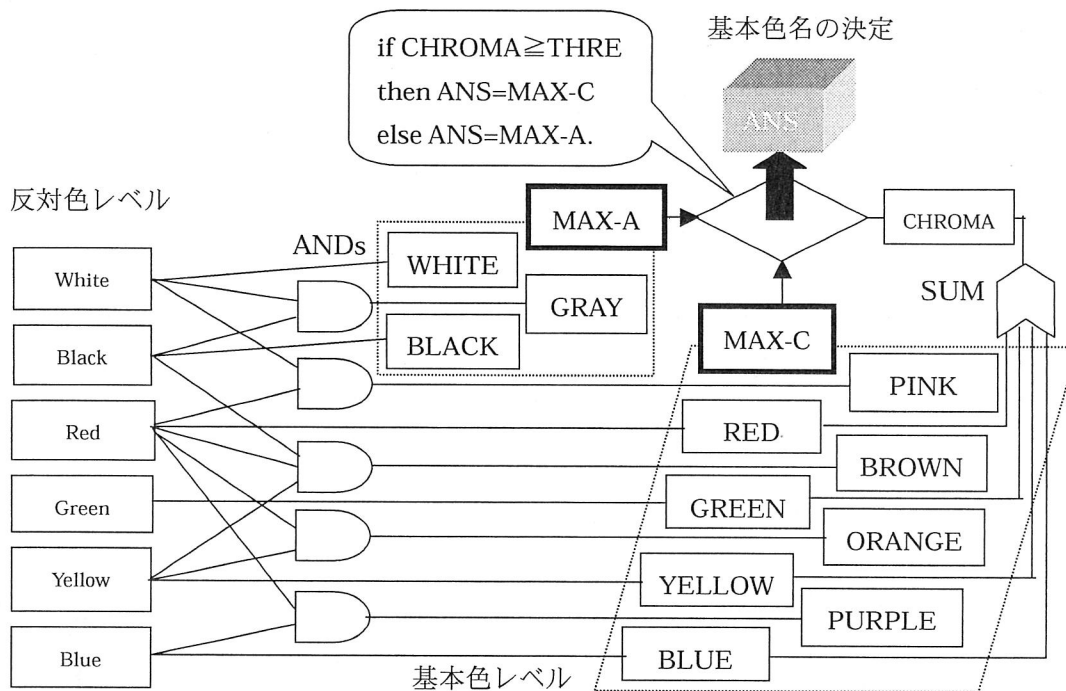


図4-2-6 基本色のカテゴリカル認識モデル

被験者 KO :

$K_{orange}=1.0$, $K_{purple}=1.0$, $K_{pink}=2.0$, $K_{brown}=2.5$, $K_{gray}=2.0$, $THRE=1.0$

被験者 GHF :

$K_{orange}=1.3$, $K_{purple}=1.2$, $K_{pink}=1.8$, $K_{brown}=2.4$, $K_{gray}=2.0$, $THRE=2.1$

両被験者間で定数値に若干の違いが見られるが、これは実験結果の個人差（各基本色の分布の違い）を定量的に表すものであり、逆に言えばこれら定数の違いだけでカテゴリカル・カラーネーミング実験の結果の個人差を説明することができることを意味している（実際にはエレメンタル・カラースケーリングの結果にも個人差があるので、両方の個人差の影響を含んでいる）。例えば、THRE の値が大きく異なるのは、どの程度色みがあれば有彩色とみなすかの判断基準が両被験者間で異なっていたことを示しており、今回の場合は GHF の方が無彩色と応答しやすい被験者であったことを意味している。このように、基本色応答の個人差を具体的な形で分析できるのも本モデルの有効性の1つである。

図4-2-7に被験者 KO の周辺なし条件でのモデルによる予測結果を示す。これを実験結果である図4と比較すると、非常に精度の高い予測が行われていることが見てと

れる。すなわち、図4-2-4にプロットされている点はすべて図4-2-7の同じ位置に存在している。図4-2-4ではシンボルが抜けている部分があるのに対し、図4-2-7は隙間なくシンボルがプロットされているのは、今回はモデルで計算された最大値の応答をそのまま予測値としているためである。実際には、複数の基本色ユニットの応答が拮抗している場合には、カテゴリカル・カラーネーミングの応答も確率的に揺らぐものと考えられる。例えば、YELLOW領域とORANGE領域の境界では、YELLOWの応答もORANGEの応答もほぼ同程度あるため、生体内部のノイズ等によって、ある時はORANGEだが、ある時はYELLOWを選択することが予想される。したがって、このような「ゆらぎ」も考慮することによって、「曖昧」な応答データ（常に同じ応答をしない場合）を確率的に予測できるモデルも構築可能である。

モデルのパラメータを増やして、予測の精度を上げることも可能である（実際、RedとYellowの重み付けを変えて、 $ORANGE = Red^\alpha \cdot Yellow^\beta$ として最適値を求めると、さらに数%予測力が上昇した）が、今回のような比較的シンプルなモデルでも、かなりの精度で基本色応答を反対色応答から一意的に導けることが分かった。また、本モデルの最大の特徴は、色光が光源色モードか物体色モードかにかかわらず結果を説明できる点にある。これは、単に測色値や色空間から基本色を予測する⁹⁾¹⁰⁾のではなく、反対色応答を経由して基本色分布を記述していることに起因しており、光源色モードと物体色モードにおける色の見えを統一的に説明できる「非線形色認識モデル」としての有効性を示している。

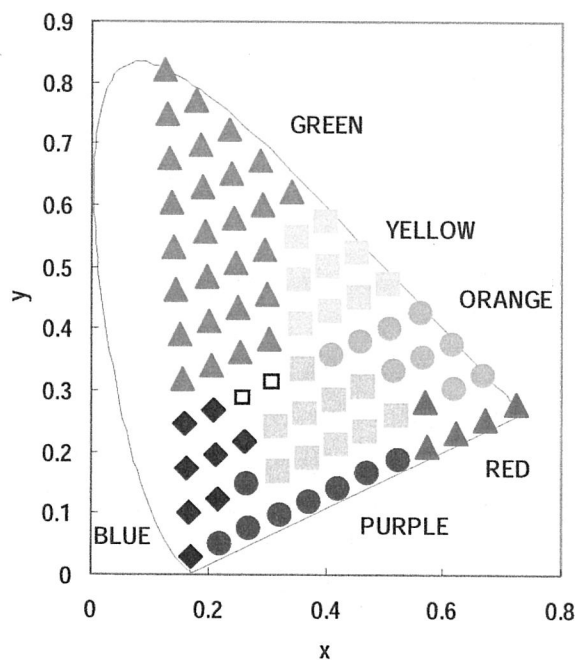


図4-2-7 被験者 KO の周辺なし条件のカテゴリカル・カラーネーミングの予測値

4. 2. 5 まとめ

反対色成分の応答に対応するエレメンタル・カラースケーリングから得られたデータと、基本色応答に対応するカテゴリカル・カラーネーミングから得られたデータから推定される基本色のカテゴリカル認識モデルを紹介した。本モデルは比較的シンプルな積算回路を有するネットワークモデルであるが、光源色モードや物体色モード等の見えのモードにかかわらず、1つのモデル（パラメータ）だけで基本色の応答を反対色応答から統一的に精度良く予測できる。本モデルは、生理学的モデルとしても妥当性が高いが、色の見えを予測するためのツールとしての応用性も高い。反対色メカニズムを錐体応答で記述した反対色モデルや、照明光の影響を考慮した色順応モデルと統合することにより、測色値からその基本色の応答までを予測できる適用範囲の広い色覚モデルも構築可能である。これまでに蓄積されている色の見えの膨大な心理物理学的データを、色覚モデルを使って定量的に検討できる可能性を示唆しており、生理学の見解と組み合わせることで、色覚メカニズムに関する精緻な理解が今後進むものと期待される。

参考文献

- (1) R. M. Boynton et al., : Hue-Wavelength Relation Measured by Color-Naming Method for Three Retinal Locations. *Science*, **146**, 666-668 (1964)
- (2) J. Gordon and I. Abramov: Scaling Procedures for Specifying Color Appearance. *Color Res. Appl.*, **13**, 146-152 (1988)
- (3) B. Berlin and P. Kay : Basic Color Terms: Their Universality and Evolution, CSLI Publications (1999)
- (4) R. M. Boynton and C. X. Olson: Salience of Chromatic Basic Color Terms Confirmed by Three Measures. *Vision Res.*, **30**, 1311-1317 (1990)
- (5) V. Walsh et al.: The Effects of Lesions of Area V4 on the Visual Abilities of Macaques: Colour Categorization. *Behav. Brain Res.*, **52**, 81-89 (1992)
- (6) H. Komatsu et al.: Color Selectivity of Neurons in the Inferior Cortex of the Awake Macaque Monkey. *J. Neurosci.*, **12**, 408-424 (1992)
- (7) T. Yoshioka et al.: Neuronal Mechanisms of Color Categorization in Areas V1, V2 and V4 of Macaque Monkey Visual Cortex. *Behav. Brain Res.*, **76**, 51-70 (1996)
- (8) K. Okajima et al.: Color Vision Model for Opponent and Categorical Color Perception. *Proceedings of the 8th Congress of the International Colour Association (AIC Color 97)*, 203-206 (1997)
- (9) R. M. Boynton and C. X. Olson : Locating Basic Colors in the OSA Space. *Color Res. Appl.*, **12**, 94-105 (1987)
- (10) J. Sturges and T. W. A. Whitfield : Locating Basic Colours in the Munsell Space. *Color Res. Appl.*, **20**, 364-376 (1995)

(岡嶋克典)

4.3 カテゴリカルカラーネーミングと反対色型色相評価結果の岡嶋モデルによる分析

反対色応答とカテゴリカル色応答の関係について、同一条件同一被験者による実験はほとんど報告されていない。我々は、6名の被験者による反対色応答とカテゴリカル色応答の実験データから、色度図上の等色相線とカテゴリカル色領域の関係が色呈示条件を変えてもほぼ保たれていることを報告した¹⁾²⁾。ここでは、反対色応答とカテゴリカル色応答の関係を、現在のところ唯一提案されている岡嶋モデル³⁾を基に検討した結果を報告する。

4.3.1 反対色型色相評価法

反対色型色相評価法とは、人間が持つ基本的な色感覚である赤、黄、緑、青（これら4色をユニーク色という）のそれぞれ赤と緑、黄と青は共存しない反対色であるという理論(反対色理論)に基づき、すべての色をユニーク色1色あるいは2つのユニーク色の混合比で評価する方法である。本研究においては図4-3-1のような反対色型色相環の円周上の位置をクリックすることにより、被験者に呈示された色刺激の色相評価をしてもらった。

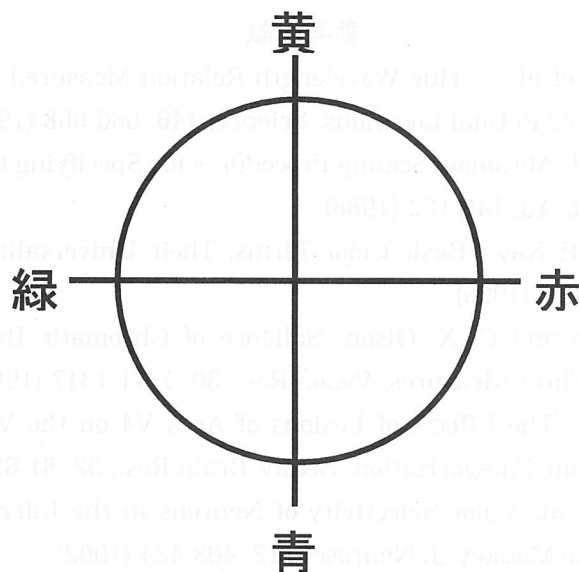


図4-3-1 反対色型色相環

4.3.2 カテゴリカルカラーネーミング法

カテゴリカルカラーネーミング法とは、観測した色刺激を色名で答えてもらう方法である。本研究では、カテゴリカル基本11色名である赤、茶、ピンク、橙、黄、緑、青、紫、黒、灰、白のどれかひとつで答えてもらう方法を採用した。

4.3.3 黒み

黒みは重要な色知覚であり、茶色、灰色、黒という物体色モード特有の色に関与することが知られている⁴⁾。無彩色だけではなく、有彩色にも影響を与えている⁵⁾。本研究では実験に用いたすべての色刺激に対し黒み評価をしてもらった。

4.3.4 実験

被験者に色刺激を呈示し、反対色型色相評価、カテゴリカルカラーネーミング、黒み評価を行うよう指示した。

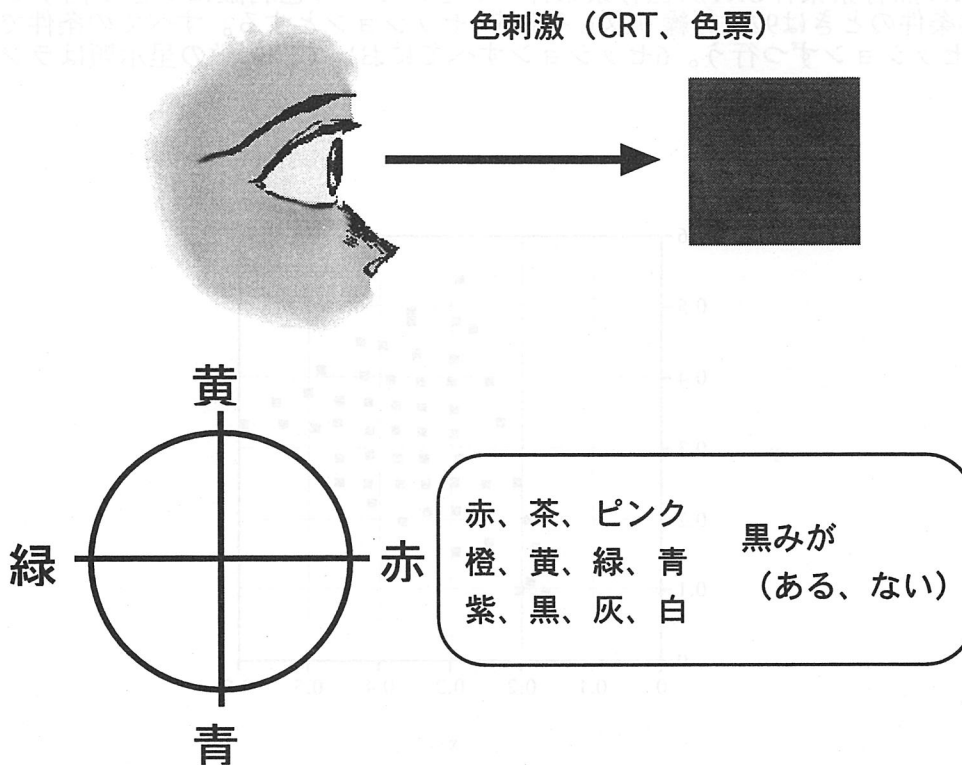


図4-3-2 実験原理

刺激

CRT黒背景条件とCRT灰色背景条件の刺激としては図4-3-3(a)の色度図上の56点を、色票条件での刺激としては図4-3-4(b)の色度図上の92点を用いた。

被験者に呈示する刺激の大きさ、刺激の平均輝度、背景色度を示す(図4-3-4)。

色票を刺激として用いた条件を物体色モードの実験とし、CRTの黒背景上にCRTの色刺激が呈示される条件を光原色モード、同じCRTでも背景の輝度を挙げることにより物体色になるという報告がある⁶⁾⁷⁾ので、CRTの灰色背景上にCRTの色刺激が呈示される条件を物体色モードとした。

実験手順

被験者が実験暗室に入り、5分程度の暗順応をしてから実験を行う。

被験者と刺激の間のシャッターが開き、被験者は刺激を観察しながら反対色型色相評価を行う。シャッターが閉まる。刺激はそのまま、再びシャッターが開く。被験者は刺激を観察しながら、黒み評価とカテゴリカルカラーネーミングを行う。シャッターが閉まり、実験者が刺激の交換をする。

実験手続き上の反対色型色相評価法を説明する。

被験者の手元のデジタイザに、図4-3-5のような色相評価環が貼ってあり、被験者は色刺激を観察しながら色相評価を行う。図中の刺激Aのような橙色の刺激を観察し黄と赤の知覚的な混合比率がちょうど矢印Aで示されるあたりだと感じたならば、被験

者が色相評価間の矢印Aの位置をマウスでクリックするように指示する。矢印Aの位置から、例えばY:R=8:2というデータが得られるようになっていく。その他の刺激B、Cについても同様である。被験者はすべての色刺激に対して、この様にして色相評価を行う。

1 試行は反対色型色相評価、黒み評価、カテゴリカルカラーネーミングから成る。これをCRT黒背景条件CRT灰色背景条件のときは1つの色刺激につき1回ずつ56試行、色票条件のときは92試行繰り返しそれを1セッションとする。すべての条件で、それぞれ6セッションずつ行う。6セッションすべてにおいて、刺激の呈示順はランダムである。

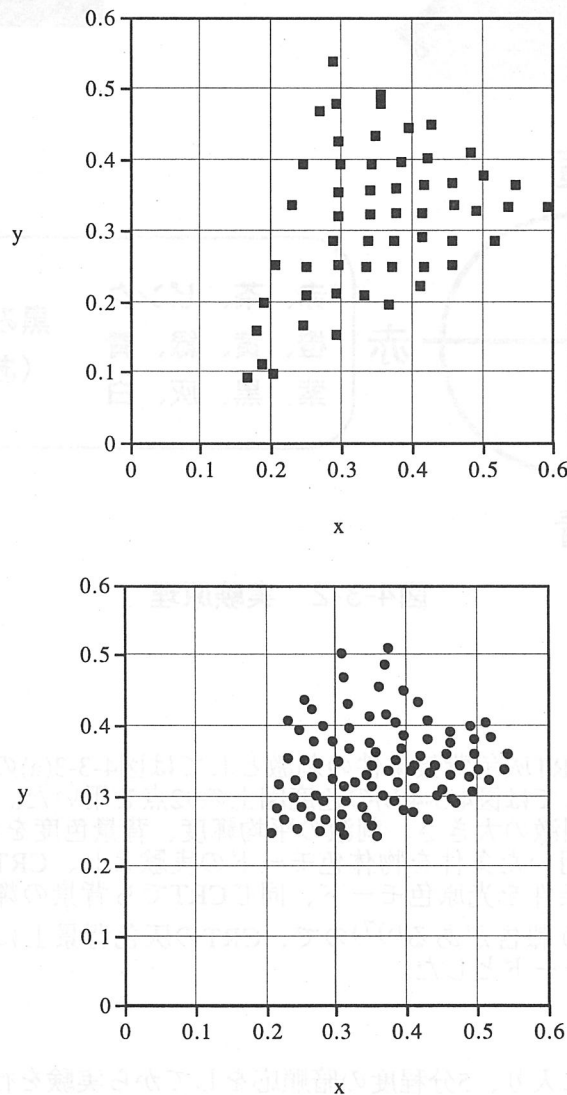


図4-3-3 CRT刺激(a)および色票刺激(b)の色度

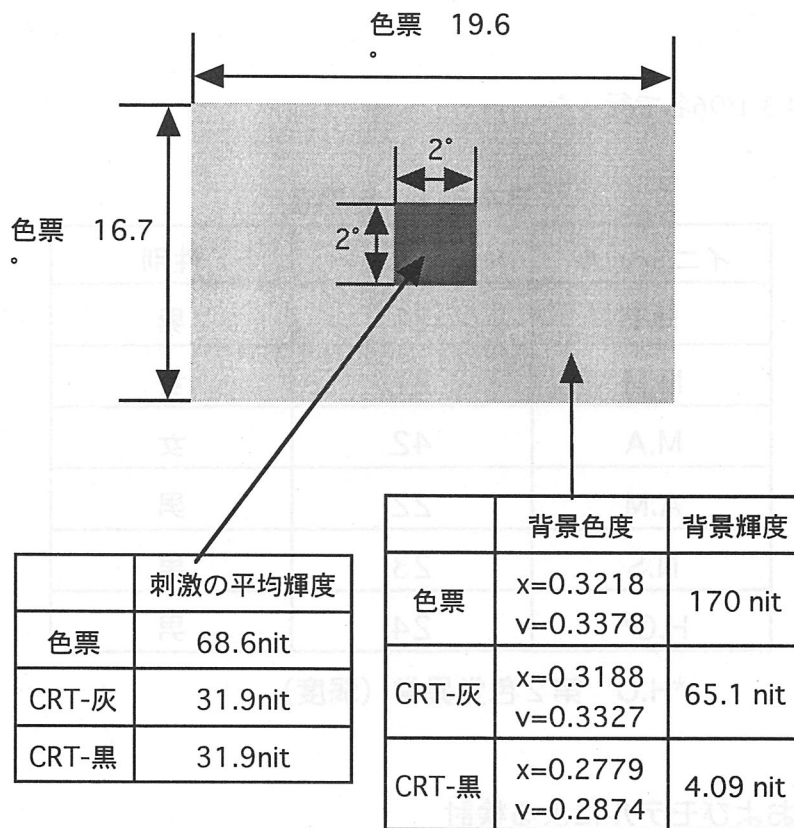


図4-3-4 刺激図

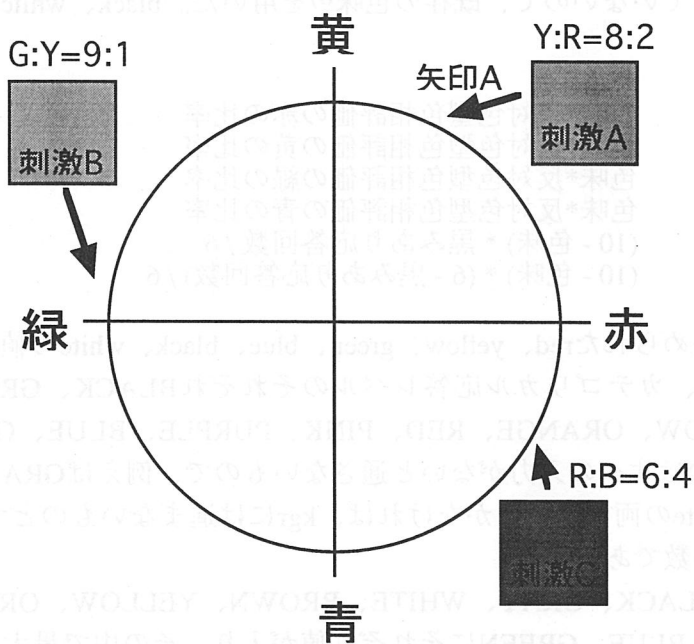


図4-3-5 色相評価環

(デジタイザ上の図には、図のような数値や色刺激、矢印はない)

被験者

被験者は表4-3-1の6名で行った。

表4-3-1 被験者

イニシャル	年齢	性別
H.T	21	男
M.M	21	女
M.A	42	女
A.M	22	男
N.S	23	男
H.O*	24	男

*H.O 第2色覚異常（弱度）

4.3.5 結果およびモデルによる検討

岡嶋モデルに基づく反対色過程からカテゴリカル色判断レベルへのつながりの概念図を図4-3-6に示す。図中のred、yellow、green、blueには、反対色型色相評価によって得られた赤、黄、緑、青それぞれの比率に各色刺激の色味を掛けたものが入る。実験では色味評価を得ていないので、既存の色味⁸⁾を用いた。black、whiteには以下の色の値が入る。

red	=	色味*反対色型色相評価の赤の比率
yellow	=	色味*反対色型色相評価の黄の比率
green	=	色味*反対色型色相評価の緑の比率
blue	=	色味*反対色型色相評価の青の比率
black	=	(10 - 色味) * 黒みあり応答回数 / 6
white	=	(10 - 色味) * (6 - 黒みあり応答回数) / 6

この様にして決められたred、yellow、green、blue、black、whiteの値がANDとkblk～kpuの係数を通り、カテゴリカル応答レベルのそれぞれBLACK、GRAY、WHITE、BROWN、YELLOW、ORANGE、RED、PINK、PURPLE、BLUE、GREENの値となる。ここでのANDはすべての入力がないと通さないもので、例えばGRAYのkgrの手前のANDはblackとwhiteの両方の入力がないと通さないものとする。kblk～kpuはゲイン調整の係数である。

そして右側のBLACK、GRAY、WHITE、BROWN、YELLOW、ORANGE、RED、PINK、PURPLE、BLUE、GREENにそれぞれ値が入り、その中で最大の値を持つものがカテゴリカル色名として採用される。

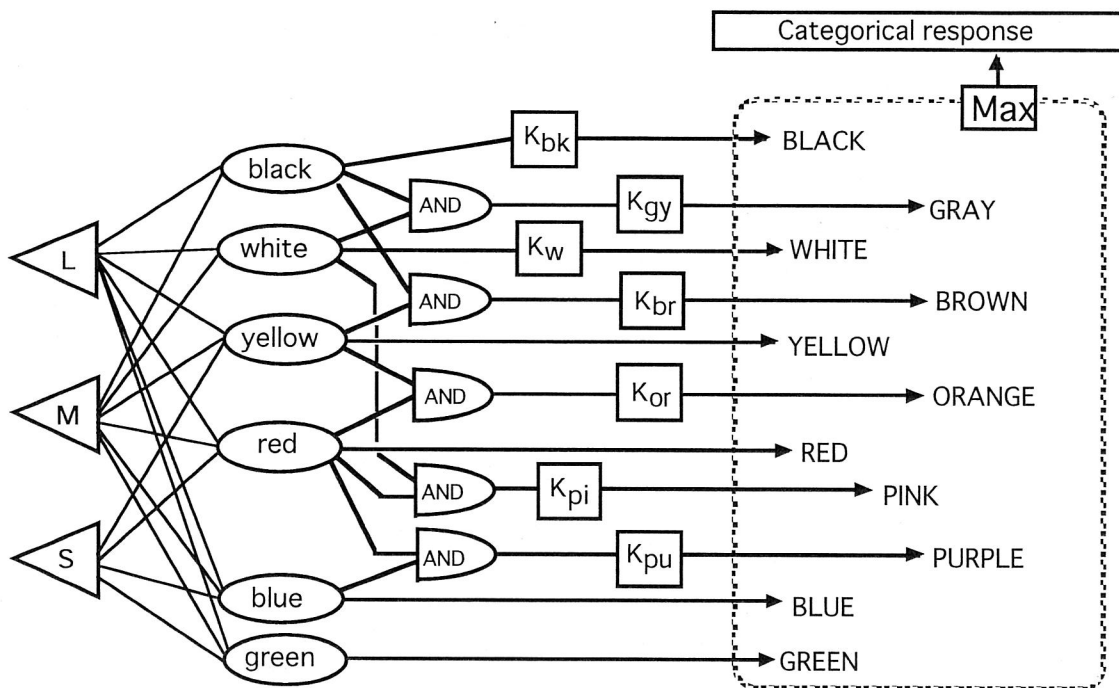


図4-3-6 岡嶋モデルの概念の模式図

反対色型色相評価と黒み評価の実験データからカテゴリカルカラーネーミングの結果を予測し、実験で得られたカテゴリカルカラーネーミングの結果と比較した。このときの係数 $k_{blk} \sim k_{pu}$ をそれぞれ0~1の範囲で0.1刻みのforループで値を変えながら比較を行い、各被験者各条件でカテゴリカルカラーネーミングの実験値と予測値の一致率が最も高くなるときの係数を採用した。

図4-3-7の上段に被験者NS（色覚正常者）のCRT灰背景条件におけるカテゴリカルカラーネーミングの結果を、下段には各々の刺激点における反対色応答からカテゴリカルカラーネーミングを推測した結果を示す。図4-3-7において色名シンボルが付いている点はその色名で実験値と推測値が一致したことを示しており、その他の点は実験値と推測値が合わなかったことを示す。この条件での実験値と推測値の一致率は80.4%であった。全条件での全ての被験者での一致率の平均は、73.2%で比較的良好な一致といえよう。このモデルは、反対色応答からカテゴリカル色判断への色覚過程の1つの有効なモデルといえる。

(阿山みよし)

カテゴリカルカラーネーミング結果
 実験値と推測値 (N.S CRT灰背景)

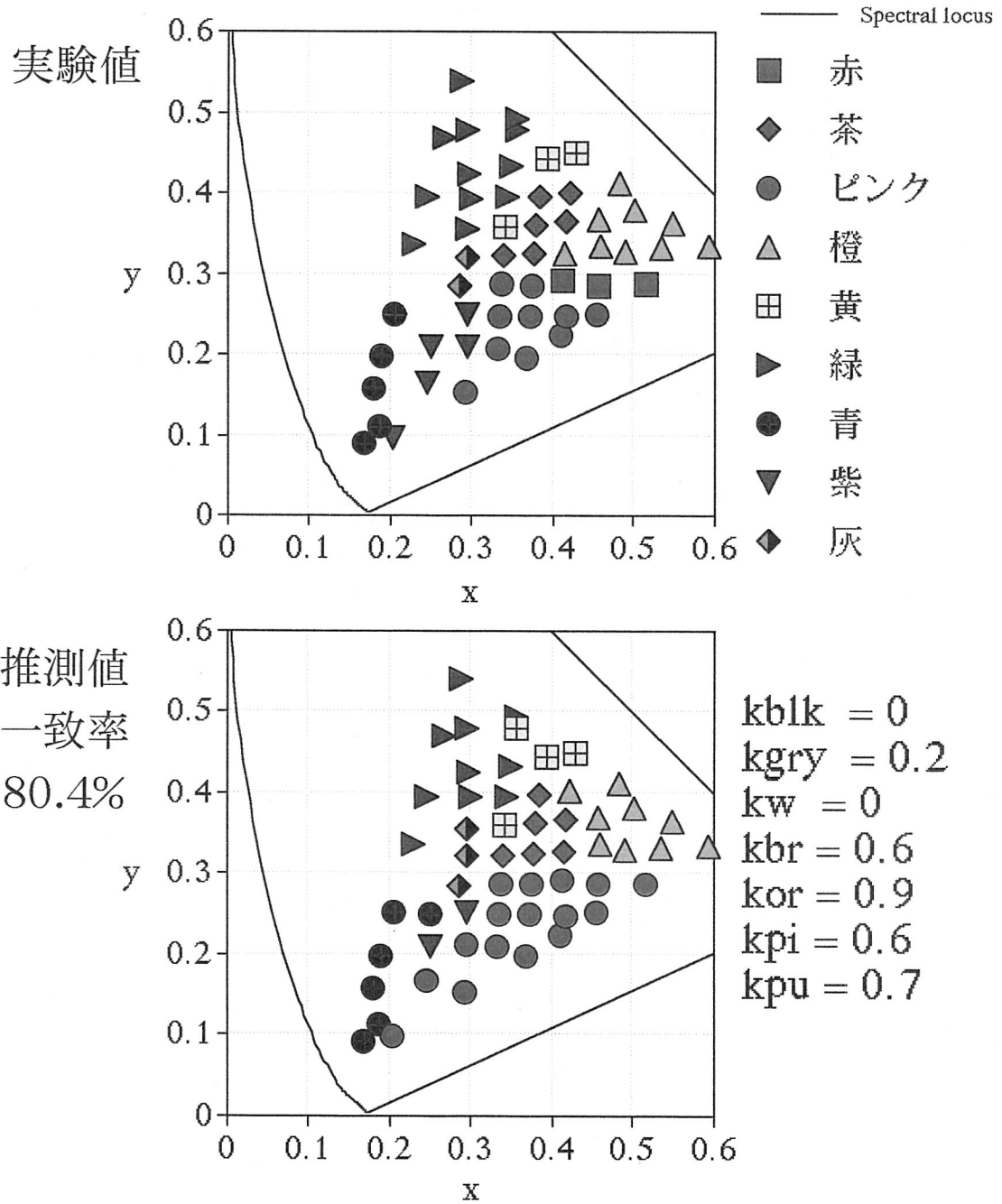


図4-3-7 カテゴリカルカラーネーミングの実験値（上段）と岡嶋モデルによる推測値（下段）との比較

参考文献

- 1) 大月、外山、阿山：“CRTおよび色票刺激でのカテゴリカル色領域と等色相線の関係”，Optics Japan '97 講演予稿集，p269-270, 1997.
- 2) 阿山、大月、外山：“色度図上の等色相線とカテゴリカル色領域”，カラーフォーラム JAPAN '97 論文集，p85-87, 1997.
- 3) K.Okajima, A. R. Robertson and G. H. Fielder : "Color Vision Model for Opponent and Categorical Perception", Proceeding of AIC Color 97, pp.203-206, 1997.
- 4) 篠森敬三, 中野靖久, 内川恵二：“周辺単色光による空間的黑み誘導”, 光学, 第21巻, 第2号, pp.102-112, 1992.
- 5) Keizo Shinomori, Brooke E. Scheffrin, and John S. Werner : "Spectral mechanisms of spatially induced blackness: data and quantitative model", J. Opt. Soc. Am. A, Vol.14, No.2, pp.372-387, 1997.
- 6) 内川、栗木、篠田：“開口色と表面色モードにおける色空間のカテゴリカル色名領域”, 照明学会誌, Vol.77, No.6, pp.74-82, 1993.
- 7) 岡嶋、池田：“白色光における輝面色モードと表面色モードの見えの定式化”，光学, 第18巻, 第10号, pp.558-564, 1989.
- 8) 阿山みよし, 池田光男：“u'v'色度図全域における色光の色相および飽和度”, 日本色彩学会誌, Vol.18, No.3, pp.186-199, 1994.

第5章 カテゴリカル色認識の照明・色彩工学への応用

5.1 カテゴリカル色認識と高効率ランプの開発

5.1.1 はじめに

近年、地球環境保護の観点から省エネルギーが人類の大きな課題となっており、照明においても同様にさらなる省エネルギーへの取り組みが求められている。

さてここで、照明光源の発光効率と演色性の関係について考えてみると、一般的・定性的には演色性を高めた場合には発光効率が低下し、発光効率を高めた場合には演色性が低下する関係がある。

ゆえに、省エネの観点に立って照明光源の選定を考えた場合、全ての照明の場において高い演色性が第一義に要求されているわけではない。例えば、道路や街路などの屋外照明の様な場では照明光源に対して、一般の屋内照明と同様な高演色性よりも、むしろ必要十分な演色性が確保できれば、より高い効率が求められることが多い。そこで、この様なニーズに応える、必要十分な演色性と高効率とを兼ね備えた効率本位形の光源が必要となる。

しかし、必要十分な色の見えを実現しながら、高い発光効率を得る光源を、平均演色評価数 R_a や特殊演色評価数 R_i を指標として単純に評価し、開発することは困難である。

例えば、屋外照明に広く用いられている以下の光源について R_a や R_i を比較してみる。

●蛍光水銀ランプ : $R_a=40$, $R_9(\text{赤})=-106$, $R_{10}(\text{黄})=-13$, $R_{11}(\text{緑})=6$, $R_{12}(\text{青})=-15$

●効率本位形高圧ナトリウムランプ : $R_a=25$, $R_9(\text{赤})=-190$, $R_{10}(\text{黄})=39$, $R_{11}(\text{緑})=-38$, $R_{12}(\text{青})=23$

厳密には、これらの数値は比較的近い相関色温度の光源同士の比較に用いられるべきであるが、こういった光源間で R_a の高低を論じても、必要十分な色の見えが実現できているのか否かは不明である。また、特殊演色評価数 R_i ($i=9\sim 12$) がたとえマイナスになっているからとしても、目的とする色が認識出来ているのか否か、などの判断はつかない。

特に、 $R_{12}(\text{青})$ などは、青白い発光光色で青系の色み比較的是っきり知覚できる蛍光水銀ランプがマイナスの値であり、それよりも、オレンジの発光光色で青系の色みが比較的是っきりとは知覚しにくい効率本位形ナトリウムランプがより大きなプラスの値となっているなど、実生活の中で感じる感覚とこれらの数値は必ずしも合致しない。

したがって、人間の視覚・色覚に対しての心理物理的なアプローチから、必要十分な色再現とは何か、その要件を明確にする必要があるとともに、その評価の指標作りが必要である。

5.1.2 カテゴリカル色知覚に基づく照明光源の演色性評価

次に、ここで論じる必要十分な色再現とは何かについて述べる。

日常生活場面において、隣り合わせた色を同時対比させ、色みの違いを見分けるような場合は、非常に細かな色の違いを見分けることができる一方、日常生活の中で無意識的に認識している色数はさほど多くない。この様に人間の色知覚の能力は、微妙な色みの違いを細かに見る能力と、その色が何色か色を大きく分類的に判別する能力との二面性を持っている。

例えば、夜間の高圧ナトリウムランプの道路照明下と、昼光の下での赤の標識の色の見えを注意して見てみると、前者は黄みを帯びた赤に、後者は鮮やかな赤に知覚できる。しかし、どちらも“赤”は“赤”であると色をその概念毎に分類的に把握する認識も同時に行っているのである。このような、色をその特徴毎に大きくカテゴリー分類して判断する能力はカテゴリカル色知覚（カテゴリカル色認識）と呼ばれている。そこで我々はこの人間のカテゴリカルな色知覚の特性に着目し、照明光源にとって最小限の色再現を実現するという事は、各種基本色が各々その色として十分にカテゴリカルな知覚が可能か否かであると想定した。

このカテゴリカルな色知覚に関しては多方面からのアプローチが行われているが、ここでは、Berlin と Kay¹⁾による赤・青・黄・緑・橙・桃・紫・茶・白・黒・灰の11色の基本色(Basic Color)の分類の中でも、特に視覚の反対色応答成分の赤と緑、黄と青、および、無彩色の白と黒に対応し、より根元的な色彩のカテゴリーと考えられている赤・青・黄・緑・白・黒の6色の基本色(Primary Color)²⁾に対する見えを必要最小要件の指標とすることにした。

今回、高効率、かつ、必要十分な色の見えを有する光源の一実施例として、まずは屋外照明の中でも省エネが強く求められている道路交通照明(特にトンネル照明)分野への応用を想定した。この場合、交通安全の観点から、視覚情報として重要な色を考えると、道路標識の赤、青、黄、緑、白、黒や、路面表示の白、黄であると言え、前記6色の基本色(Primary Color)に合致する。また、これらの色表示は、その色のカテゴリーのイメージの代表色になりやすい高彩度な色を用い、カテゴリカルに色と意味を符号化して、視認性とその色の意味の判読性を高めている。このような交通安全上の識別色としてとっさの判断に有効なのは、ある程度制限された数の色のカテゴリー判断であり、ここでは、赤の標識が僅かに黄みがかって演色されるか青みがかって演色されるかといった、光源の微妙な色再現性の違いよりも、赤の標識が赤として大きく色の分類的な識別が可能であるか否かと言うようなカテゴリカル

な色再現性に基づいた評価がなされるべきである。

5.1.3 カテゴリカル色知覚に基づく照明光源の分光分布の検討

高い演色性と、高い発光効率を両立した光源としては、R (赤)、G (緑)、B (青) のスペクトル帯域に発光を集中する3波長域発光形光源が知られているが、過去に3波長域発光形光源の開発と前後して、これよりもさらに高効率な2波長域発光形光源が Einhorn³⁾、Walter⁴⁾、Ivey⁵⁾、Verstegen⁶⁾らにより検討されたことがあった。これはできる限り高い発光効率をRaを両立することを制限条件に、数理計画法を用いコンピュータにより光源の分光分布の最適化シミュレーションを行った場合、Y (黄)とB (青)のスペクトル帯域に発光を集中すれば、理論的には3波長域発光形光源以上の高い発光効率を有する光源が実現できるというものであった (以下Y-B系2波長域発光形光源という)。

しかし、このような光源は高いRaが望めないこと、赤のスペクトル成分の欠落により、危険などの重要な意味の表示に用いられる赤の色の判別がしにくいこと、さらに、このスペクトル帯域において、実用的で効率の良い発光材料が存在しなかったことなどから、このような光源は実用上の課題が多かった。

ここで、Raという概念から離れ、カテゴリカル色知覚という新たな見地から2波長域発光形光源を再考した場合、Raで評価されるような忠実な色再現は不可能でも、色のカテゴリカルな認識が十分可能な色再現の可能性は考えられる。

必要十分なカテゴリカルな色再現を実現する光源の分光分布を考えた場合、単スペクトル発光の低圧ナトリウムランプに、可視光の全帯域に広い発光を有する白熱電球を光束比で10~20%程度に混光することで色の見えの改善が図れることが、阪口⁷⁾やBoynton⁸⁾らにより明らかにされている。

また、カテゴリカルな色再現が可能な光色を考えた場合、黒体放射軌跡から外れた色みの強い光色の照明光や、極端に相関色温度が高い、もしくは低い、広範囲な光色の範囲でもカテゴリカルな色が見えが得られることが栗木⁹⁾¹⁰⁾や内川¹¹⁾らにより報告されている。

これれから、単スペクトルなどの極端な場合を除けば、カテゴリカルな色見えを与える分光分布と色度範囲の設定範囲は比較的広いものと予想できる。分光分布と色度範囲の制限条件はゆるやかであり、かつ、発光波長帯域を2波長に絞り込むことで高い発光効率を得ようとする、視感度の高いG (緑)の発光で発光効率をかせぎ、これにR (赤)の発光を加えることで、危険などの重要な意味に用いられることの多い赤の色を確実に認識させることが考えられる。

さらに、光源としての実現性を考慮して場合、現存の実用的な蛍光体に赤(R)と緑(G)の発光を示す蛍光体に発光効率の高いものが多いこと、また、蛍光ランプでの実現を考えた場合、青の発光帯域には水銀輝線が存在するため、赤(R)と緑(G)のみの発光の蛍光体を用いても、現実にはある程度の青の見えは確保できることも

考慮し、R-G系2波長域発光形蛍光ランプの優位性に着目して、カテゴリカルな色再現性を有する高効率蛍光ランプを実験検討した。

5.1.4 カテゴリカル色知覚に基づく照明光源の実験

5.1.4.1 実験方法

交通照明分野（特に道路トンネルなど）を前提に、各種光源下での道路交通上重要な色のカテゴリカルな見えを以下の手法で評価した。

1) カテゴリカルな色の見えの許容度¹²⁾

主観的な色の見えの許容度を評価するため、色の見えの許容度を”許容できる”を中心に、”良い”，”悪い”などの評価カテゴリーからなる単次元尺度で評価する方法

2) エレメンタルカラーネーミング¹³⁾¹⁴⁾

主観的な色の見えを色の基本的な要素に分解して評価するため、10点の持ち点を色票に感じる色み、白み、黒みに配分する判断を行い、再び持ち点を10点として、色みを、赤み、緑み、黄み、青みの中から一つまたは二つを選択して持ち点を再配分することにより、主観的な色の見えを評価する方法

これら評価手法をベースに、よく訓練された正常色覚を有する成人3名の被験者、評価色票面の照度は200[lx]で実験を行った。以降、特に断らない場合は被験者数3名の繰り返し回数3回の実験結果である。

評価色票としては、道路交通上の代表的な安全色である道路標識色(以下、R=赤:7.5R4/13.5, G=緑:5G4/8, Y=黄:2.5Y8/12.5, B=青:7.5PB2.5/7.5, W=白:N9.3, BK=黒:N1.5)¹⁵⁾・路面標示黄色(以下、YR=路面黄:5.5YR6.5/12)¹⁶⁾を選定した。そして、実際の視環境には複数の色が混在していること、標識には複数の色を組み合わせ使用されるということなどから、各色票を視角寸法2[°]の視標とし、視角寸法10[°]におさまるように灰:N5の背景上に同時提示した。以下、これら色票を道路交通安全色彩と呼ぶ。

試料光源としては、蛍光ランプ用の実用蛍光体中で最も効率の高い緑発光の希土類蛍光体(LAP=LaPO₄:Ce, Tb)単体を蛍光体層とした蛍光ランプ(以下、G-FL)に、赤発光の希土類蛍光体(YOX=Y₂O₃:Eu)単体を蛍光体層とした蛍光ランプ(以下、R-FL)を混光し、その光束比率を変化させたものを用いた。G-FLとR-FLの光束比が約55:45のとき、Duvがほぼ0となり、相関色温度は約2600[K]となる。

(Duvとは光源の色度点の黒体軌跡からのズレの量を1960uv色度座標の偏差×1000で示したものであり、Duvが0のとき光源の発光色が黒体放射軌跡上にあること、Duvがプラスのとき光源の発光色が黒体放射軌跡より緑みにあること、Duvがマイナスのとき光源の発光色が黒体放射軌跡より紫みにあることを示している。)

これに対し比較光源として、道路交通照明に広く用いられており、これらに類する比較的低い相関色温度を有する NX(低圧ナトリウムランプ)、NH(高圧ナトリウムランプ)を選定し、比較的低い相関色温度を有する Ra の高い光源の代表として、EX-L(3 波長域発光形蛍光ランプ:電球色)を選定した。また、比較のため D65-FL(蛍光ランプ D65)を評価に加えた。

実験の手順としては、まず、基準条件の D65-FL に 5 分間順応した後、各種試験光源に切り替え、さらに試験光源下で 5 分間順応してから主観評価を行った。

5.1.4.2 実験結果

1) カテゴリカルな色の見えの許容度

図 1 はカテゴリカルな色の見えの許容度を評価した結果である。

図の縦軸は各色票の色のカテゴリカルな見えの評価を累積表示したもので、各色票毎の“良い”、“許容できる”の評価が得られた数の合計を示している。また、横軸は光源の種類を示しており、特に G-FL から R-FL の間は光束比で示した混光比率と横軸がほぼ対応するように図示した。

G-FL:R-FL の光束比が約 55:45 で、黒体放射軌跡からの距離が最も小さくなり、Duv が約 0 となる。

結果から、R-G系 2 波長域発光形光源においては、Duv がプラス側にずれた条件にカテゴリカルな色の見えの評価が向上する領域が存在し、G-FL:R-FL の光束比が約 80:20 近傍でカテゴリカルな見えの許容度が NH よりも高くなっていることがわかる。

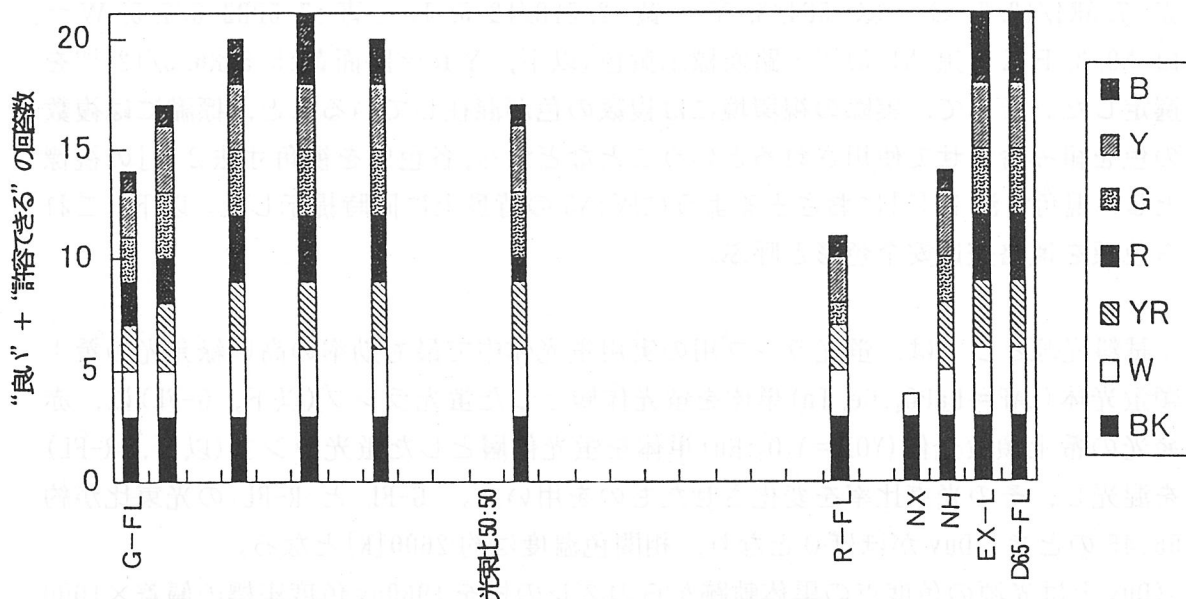


図1 カテゴリカルな色の見えの許容度

これらをさらに検討すべく、Duv がプラス側でカテゴリカルな色の見えの許容度の評価を詳細に行なった結果を図2に示す。これは、被験者数4名、繰り返し回数5回の結果である。図2 a)は”良い”および”許容できる”の評価が得られた確率で、図2 b)は”良い”の評価が得られた確率である。また、横軸はG-FLの光束比を示しており、図中の左側ほどG-FLの光束比が大きい。

”良い”および”許容できる”の評価が得られる確率は、G-FL:R-FLの光束比が約80:20よりもG-FLの光束比が増加すると急激に低下する。また、”良い”以上の評価が得られる確率にカテゴリカルな色の見えの変化がより明確に現れており、特に赤のカテゴリカルな見えがDuvが0近傍ではなく、Duvがプラス側のG-FL:R-FLの光束比が約80:20近傍で向上している。

なお、これらの評価において黒の評価は光源の種類によらず一定であったため図示していない。

以上の結果から、カテゴリカルな色の見えの評価はG-FL:R-FLの光束比が約80:20近傍で向上していることがわかる。

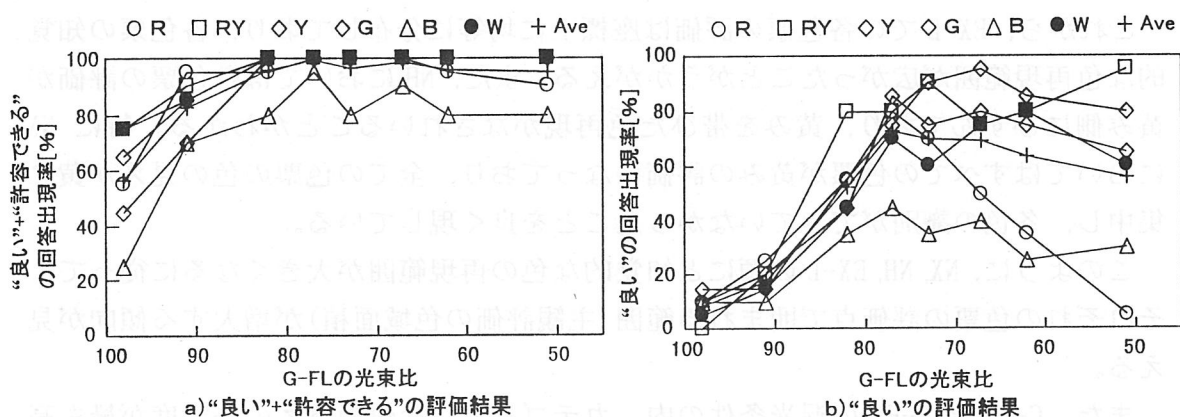


図2 G-FLとR-FLの混光比率が変化した場合のカテゴリカルな色の見えの変化

2) エレメンタルカラーネーミング

図3は各種光源の照明下における各色票のエレメンタルカラーネーミングの評価結果の平均を、色みの評価値を原点からのベクトルの長さに設定して、”赤み-緑み”, ”黄み-緑み”の反対色の色みの評価の比を直交座標上にプロットしたものである。

例えば、NHの照明下での赤の色票見えが、色み=5.0, 白み=2.7, 黒み=2.3であり、さらに色みを赤み=6.0, 黄み=4.0に評価した場合、原点からの距離である色みの5.0を赤みと黄みの軸上で6.0:4.0に分割する1点が定まる。つまり、この場合の座標上の位置は、赤み軸上で(色み:5.0)×(赤み:6.0)÷10=3.0と、黄み軸上で(色み:5.0)×(黄み:4.0)÷10=2.0である。

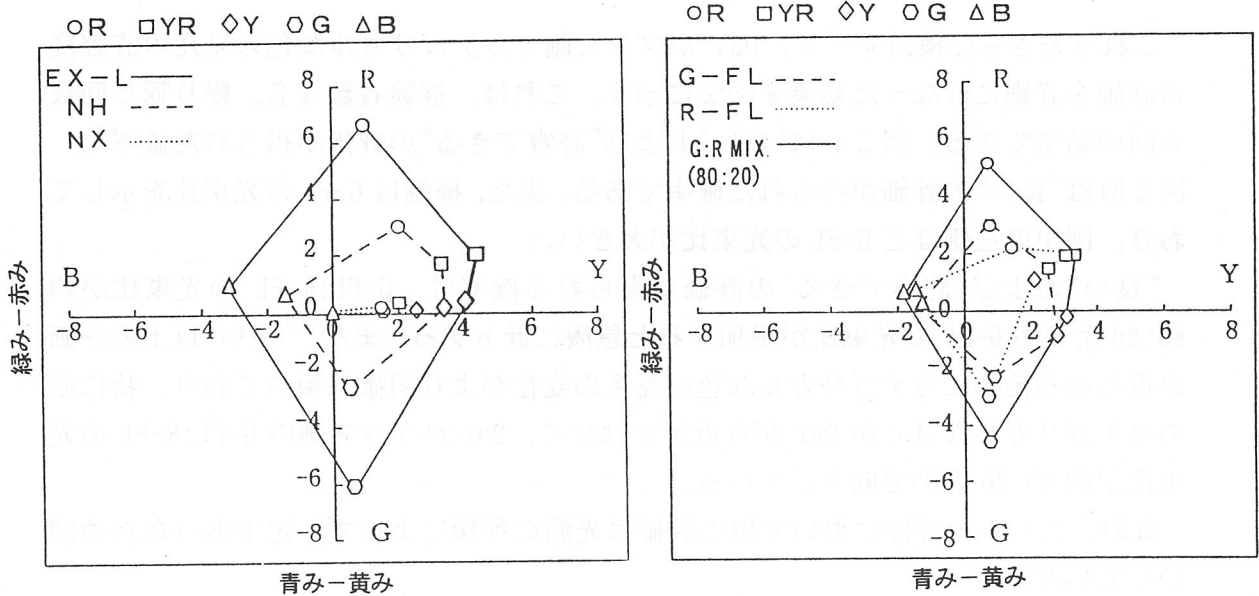


図3 エレメンタルカラーネーミングの結果

これから、EX-Lでの各色票の評価は座標上に均等に分布しており、各色票の知覚的な色再現範囲が広がったことがうかがえる。また、NHにおいては各色票の評価が黄み側にひずんでおり、黄みを帯びた色再現がなされていることがわかる。特にNXにおいてはすべての色票が黄みの評価になっており、全ての色票の色の見えが黄みに集中し、各色の識別ができていなかったことを良く現している。

このように、NX, NH, EX-Lの順にと知覚的な色の再現範囲が大きくなるに従って、それぞれの色票の評価点で囲まれる範囲(主観評価の色域面積)が増大する傾向が見える。

また、G-FLとR-FLの混光条件の内、カテゴリカルな色の見えの許容度が最も高かったG-FL:R-FLの光束比が約80:20(G:R MIX)の混光において各色票の評価が座標上に最も広く分布した。また、G-FL, R-FL単体での評価結果とは異なり、G-FL:R-FLの光束比が約80:20の混光においては、EX-Lに比して色みの強さは減少するが、色みの分布に特に大きなひずみは現われていないことが分かる。

以上から、カテゴリカルな見えの許容度と、各色間のエレメンタルカラーネーミングの主観評価の分布の広さが関連すると考えられる。

次に、この結果を、座標表現から主観評価の色域面積に変換して図4に示し、同時にRaと比較した。図4の横軸は光源の種類を示しており、特にG-FLからR-FLの間は横軸と光束比で示した混光比率がほぼ対応するように図示したものである。

これから、G-FL:R-FLの光束比が約80:20においてカテゴリカルな色の見えの許容度と主観評価の色域面積は共にピークを持つが、RaはG-FL:R-FLの光束比が約45:55であるDuv=0近傍でピークを持ち、今回の結果とは対応しないことが見てとれる。

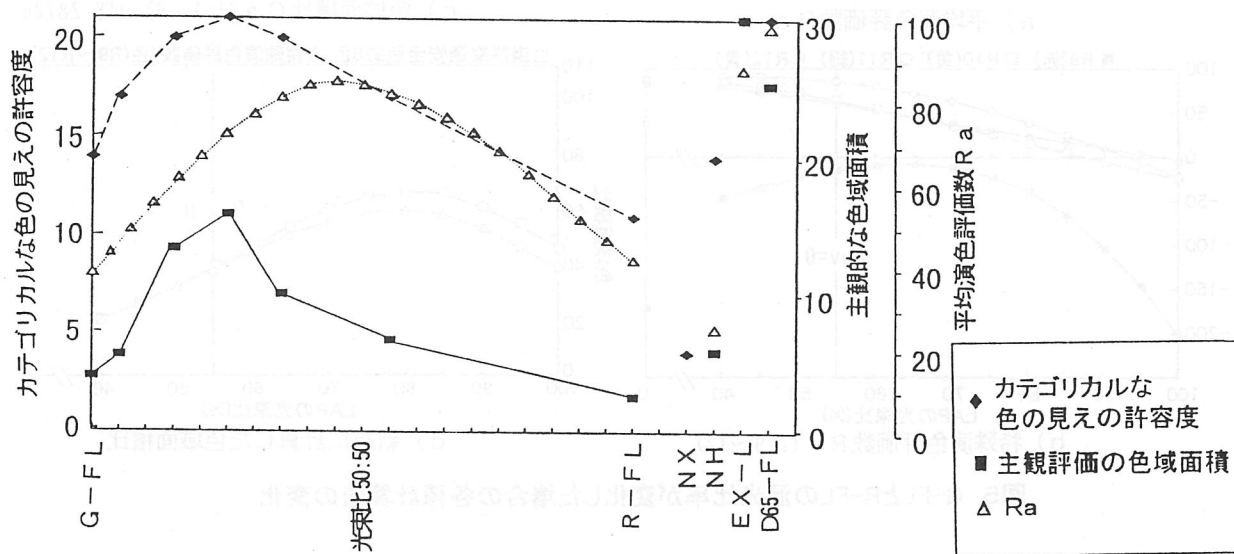


図4 カテゴリカルな色の見えの許容度と主観評価の色域面積および平均演色評価数の関係

5.1.5 色彩計算による考察

シミュレーション上でG-FL:R-FLの混光比率を変化させ、a)平均演色評価数Ra、b)特殊演色評価数Ri(R9~R12の赤,黄,緑,青)、c)色域面積比Ga(JIS Z8726¹⁷⁾で参考として記載されているR1~R8の色域面積比)、d)色域面積比の基準となる光を標準の光D65の色域面積とした値を各々計算した結果を対比させて図5に示す。図の横軸はG-FLの混光比率を示しており、図中の左側ほどR-FLに対するG-FLの光束比が大きくなっている。

Duvが0からどこまで離れた点まで、Ra等の計算値が実効的な意味を持つかは別として、Raで表されるような基準光源の演色との忠実性の高さでの評価ではDuv=0が最も評価が高くなり、今回のような実験結果の説明がつかないことと、これをRiやGaを単純に計算した結果において説明しようとしても同様であることがわかる。逆説的に言えば今回の実験では従来のRaやRiで評価されていたものとは異なる性質を捉えていると想定される。

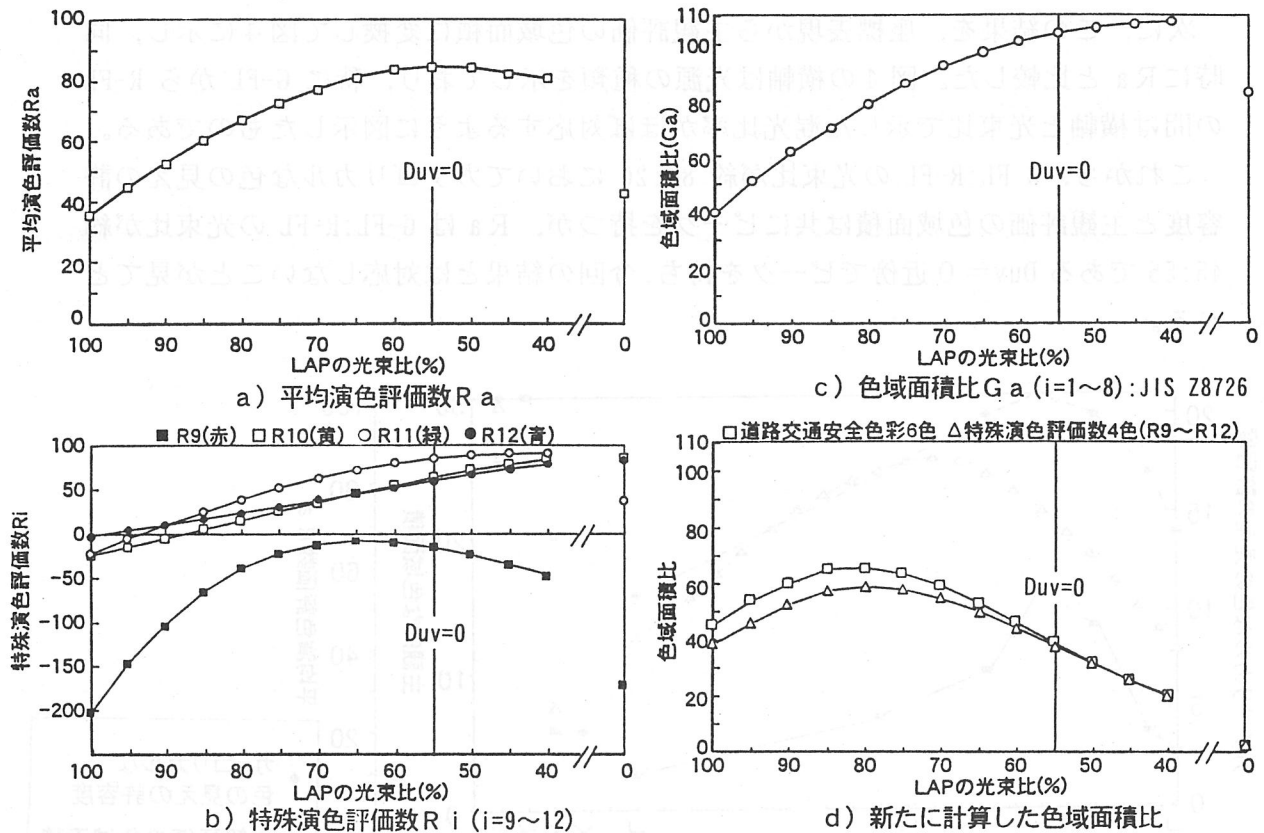


図5 G-FLとR-FLの混光比率が変化した場合の各種計算値の変化

ここで、d)に昼光下での道路交通上の安全色の見えを基準とし、色域面積比の基準となる光をテスト光源の相関色温度に対して固定するために、色域面積比の計算を行う上で分母となる光を標準の光 D65 の色域面積に固定して正規化し、道路標識色の赤、緑、黄、青と路面標示黄色の色域面積比（テスト光源の色域面積/標準の光 D65 の色域面積）を計算した。計算においては、前記の JIS の R_a 、 R_i 、 G_a を求めた計算手順と同様の方法（フォンクリース色順応方程式を用い、同等の相関色温度の基準光に順応）で色域面積を導出した。この場合、今回の評価を良く表現可能で、G-FL:R-FL の光束比が約 80:20 において色域面積比が最大となる。また、道路交通安全色彩ではなく、特殊演色評価数 $R_9\sim R_{12}$ を用いた計算においても同様な結果が得られることから、今回の結果を高彩度な色(安全色彩一般)に拡張しても同様の結論が見出せると類推できる。

これらの結果から、今回の実験の場合においては、 Duv がプラスに変移した領域において、各色票の知覚的な色みが増加したことから、カテゴリカルな色の見えを向上させる効果を生んだと考えられる。

また、 R_a や R_i では基準光源が試料光源の相関色温度によって変化するため、今回の評価結果が、標準の光 D65 による色見えと各種試料光源による色見えとの色差に単純に相関するものか否かを検討した。次に、CIE 色順応方程式¹⁸⁾を用い、

各種色票の標準の光 D65 の下での色の見えと、シミュレーション上で G-FL:R-FL の混光比率を変化させた場合の色の見えを予測し、その色差を計算した結果を図 6 に示す。

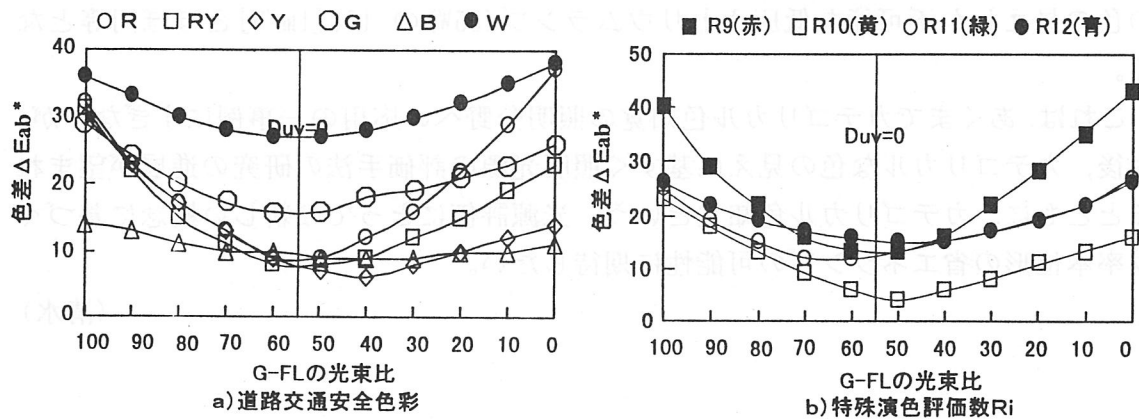


図6 各色票の標準の光D65の下の見えとG-FLとR-FLの混光比率が変化した場合の見えとの色差

これらにおいても、標準の光の下での各色票の見えとの色差が、カテゴリカルな色の見えの許容度と単純な相関関係にはないことがわかる。

以上から、カテゴリカルな色の見えを満足させる光源の開発においては、光源の演色に対し色域面積的な評価が一つの指標になりうると考える。

5.1.6 まとめ

省エネルギーと必要十分な色の見えを両立する高効率な光源を実現するため、カテゴリカル色知覚に基づく照明光源の評価を行った結果、本実験の範囲においては以下の結論を得た。

- カテゴリカルな色の見えの許容度の評価は、光源の平均演色評価数 R_a や特殊演色評価数 R_i と単純には対応しない。
- カテゴリカルな色の見えの許容度は、光源の R_a や R_i よりむしろ、色域面積によつて表現されるような、光源の色再現範囲の増減と相関がある。

以上、カテゴリカル色知覚に基づき、高効率かつ交通安全色彩のカテゴリカルな色の見えの許容度の高い光源の実現性を検証する一事例として、現在の実用蛍光体の内、高効率で特性の安定した LAP 緑色発光蛍光体を使用した蛍光ランプ G-FL および YOX 赤色発光蛍光体を使用した蛍光ランプ R-FL の混光比を変化させ各種光源と比較検討した結果、光束比 80:20 で混光することが最適であるとの結論を得た。

この分光特性を 1 本のランプ (32 形 Hf 蛍光ランプ) で実現した場合、ランプ効率約 120 [lm/W], Hf インバータ型の安定器を使用した総合効率として約 [110 lm/W]

が実現可能である。これは、従来の3波長域発光型 Hf 蛍光ランプに比べランプ効率、総合効率とも約 20%の向上となる。また、安定器の回路損失も含めた総合効率での比較においては、単スペクトル発光のため人工光源中最も効率が高いがモノカラーの色見えしか不可能な低圧ナトリウムランプ(55W)の 108[lm/W]とほぼ同等となる。

これは、あくまでカテゴリカル色知覚の照明分野への応用の一事例にすぎないが、今後、カテゴリカルな色見えに基づく照明光源の評価手法の研究の進展が望まれるとともに、カテゴリカル色知覚という、光源評価にとっての新しい概念に基づく効率本位形の省エネランプの可能性に期待したい。

(清水)

参考文献

- 1) B. Berlin, et al.: Basic color terms. (University California press, Berkley) (1969)
- 2) P. Kay, et al.: The linguistic significance of the meanings of Basic color terms. Language, 54, p. 610 (1978)
- 3) H. D. Einhorn, et al.: Inherent efficiency and colour rendering of white light sources. Illuminating Engineering 62, p. 154 (1971)
- 4) W. Walter: Optimum phosphor blends for fluorescent lamps. Applied Optics 10, p. 1108 (1971)
- 5) H. F. Ivey, et al.: Color and efficiency of fluorescent and fluorescent-mercury lamps. J. of the Optical Society of America 62, p. 814 (1972)
- 6) J. M. P. J. Verstegen, et al.: A new generation deluxe fluorescent lamp- combining an efficacy greater than 80lm/W with a color rendering index of about 85. J. of the Optical Society of America 62, p. 814 (1972)
- 7) 阪口忠男 他: 色相, 明度, 彩度がもの見え方に及ぼす影響 照明学会誌 53, p. 213 (1969)
- 8) R. M. Boynton, et al.: Categorical colour perception under low-pressure sodium lighting with small amounts of added incandescent illumination. Lighting Research and Technology 21, p. 23 (1989)
- 9) 栗木一郎 他: 色恒常性の照明光による限界 Vision 4, p. 151 (1992)
- 10) 栗木一郎: 瞬時色恒常性におよぼす周辺刺激と色見えの判断基準の効果 照明学会誌 79, p. 39 (1995)
- 11) 内川恵二: 異なった照明光下でのカテゴリカル色知覚に関する研究 照明学会誌 80, p. 557 (1996)

12) R. M. Boynton, et al. : Categorical color rendering of four common light sources.

Color research and application , 15, p. 222 (1990)

13) R. M. Boynton, et al. : Hue-wavelength relation measured by color-naming method for three retinal locations. Science, 146, p. 666 (1964)

14) 社団法人照明学会: 道路信号灯の色の分布に関する研究調査委員会 報告書 (1989)

15) 社団法人全国道路標識業協会編, 建設省道路局 警察庁交通局 監修: 道路標識ハンドブック p. 163 (1968)

16) 社団法人全国道路標識業協会編: 路面表示ハンドブック p. 304 (1983)

17) 財団法人日本規格協会: 光源の演色性評価方法 J I S Z8726 (1990)

18) CIE : A Method of Predicting Corresponding Colours under Different Chromatic and Illuminance Adaptations. CIE109-1994

5.2 カテゴリカルカラーレンダリング

5.2.1 はじめに

私達の生活環境において、様々な照明光源が用いられている。分光分布の異なる光源で物体を照明すると、色の見えが異なって見える。例えば、太陽光の下で見るのと蛍光灯の下で見るのでは、同じ物でも違った色に見えるであろう。このように光源に特有な物体色の見えについての特性を演色性という。

従来、このような色の見えの変化による照明光源の評価方法として平均演色評価数 Ra が用いられてきた。これは試料光源の下での物体色の見えが基準光源の下での色見えと一致する程度を数値化したもので、色差が評価尺度となっている。(CIE, 1974; JIS Z 8726)

私達が実際に日常生活において色を見る場合、微妙な色の差が問題になることもあるが、ある色が何色に分類されるかといった色のカテゴリによる判別がなされる場合も多くある。例えば道路標識や看板、色によって分類されたものなどは細かな色の差を明確にすることよりも、その色がもとの色と同じ色カテゴリに分類できるかどうかということの方が重要である。また、光源を利用するにあたり色の分類的な判別ができればよいのなら、より高効率の照明を利用する方が望ましい。

いま、赤のカテゴリの端に存在している色があるとする。この色を2種類の異なる光源で照明したらどちらの光源でも同じ色差だけ色見えが移動した場合、移動の方向が一方では赤のカテゴリの内側に、他方では赤のカテゴリの外側に向いていたら、その色の分類的な判別では異なる色として認識されるのに、平均演色評価数の値は同じになってしまう。このように平均演色評価数は色差に基づいた評価方法であるので、色見えが分類的にどのように確保されているのかをこの数値から判断することは難しい。そこで、光源の新しい評価方法として色のカテゴリによる手法を検討する必要があると思われる。

色のカテゴリによる分類、すなわちカテゴリカル色知覚については過去にもさまざまな研究が行われており、2波長域発光型蛍光ランプについてカテゴリカル色知覚に基づく評価を行うための研究も、清水氏¹⁾らが行っている。

この章ではカテゴリカル色知覚の定量化指標を開発するにあたり、基準光源を定め、カテゴリカル色知覚に基づく光源の評価法を示す。

5.2.2 実験方法

実験は3.4章で行われたものと同様である。

被験者は測定用光源で照明された実験ブースに入り、5分間の順応を行う。次に合計292枚のマンセル色票を1枚ずつランダムに提示し観察する。色票は灰色背景上の決まった位置(印がついている所)に置くこととする。照度は全ての光源で1000 lxとした。色票の色見えがどの色名で表されるかを決定したら、色票分類箱に分類す

る。すべての色票は11の基本色のうちのどれかで応答することとし、それ以外の色名で応答することはできないものとする。実験は各光源につき、1人の被験者が3回行った。

被験者はDS(22), HY(22)の男性2人とNU(21)の女性1人の色覚正常者3名である。

5.2.3 照明条件

実験に用いた光源は蛍光ランプ8種類¹⁾, HIDランプ5種類, 白熱電球1種類の計14種類を用いた。これらの光源の名称, 略称, XYZ表色系における色度を表5-2-1に, 色度をxy色度に示したものを図5-2-1に示す。また, 各光源の分光放射分布は図3-4-3から図3-4-16に示す。

表5-2-1: 使用した光源

種類	名称	略称	x	y
蛍光ランプ	D65近似	D65	0.3260	0.3434
	3波長域電球色	EX-L	0.4501	0.4084
	3波長域昼白色	EX-N	0.3526	0.3611
	白色	W	0.3867	0.3978
	緑色発光蛍光ランプLAP	G100	0.3355	0.5483
	2波長域蛍光ランプ	G80R20	0.4178	0.4795
	2波長域蛍光ランプ	G55R45	0.4889	0.4250
	赤色発光蛍光ランプYOX	R100	0.6045	0.3348
HIDランプ	水銀灯	H	0.3319	0.3935
	蛍光水銀灯	HF	0.3865	0.3895
	メタルハライドランプ	MHL	0.3247	0.3554
	高圧ナトリウム灯	NH	0.5399	0.4066
	低圧ナトリウム灯	NX	0.5702	0.4281
白熱電球	白熱電球	IL	0.4634	0.4120

5.2.4 光源の評価方法

3.4章で述べられたように, 色のカテゴリーは光源によって様々に変化した。そこで, これら結果を解析するため, D65を基準光源として各光源について得点をつけ, 光源の評価を行った。

得点の付け方について説明する(図5-2-2を参照)。今回は, D65下での3回とも同じ応答をした色票のみを対象に得点付けを行った。そして, 測定用光源下でのそれぞれの色票の対する応答を調べ, D65と完全に一致

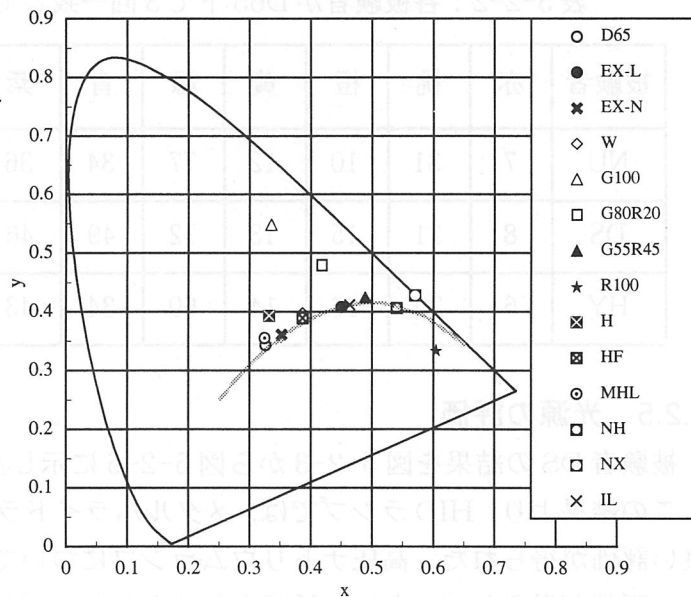


図5-2-1: 各光源のxy色度図

して3回とも同じ応答をした色票については+1点, D65とは異なる色名で, 3回とも同じ応答をした色票については-1点, それ以外の色票については全て0点として, 最終的に各被験者ごとにD65下での色票の枚数で正規化した。各被験者がD65下で選んだカテゴリーごとの色票の枚数を表5-2-2に示した。

得点は色名別につけ, 最後にその平均をとり, 光源全体の評価とした。

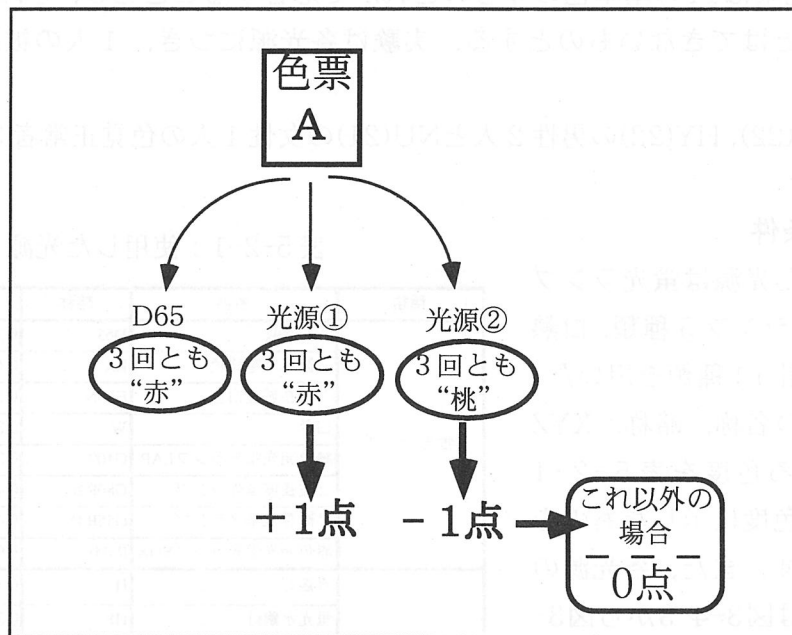


図 5-2-2：得点の付け方

表 5-2-2：各被験者が D65 下で 3 回一致して応答した色票の枚数

被験者	赤	桃	橙	黄	緑	青	紫	茶	白	黒	灰
NU	7	31	10	12	77	34	36	24	2	1	4
DS	8	21	15	13	72	49	46	19	2	1	2
HY	6	20	16	14	60	34	43	23	3	1	10

5.2.5 光源の評価

被験者 DS の結果を図 5-2-3 から図 5-2-6 に示した。

この結果より，HID ランプでは，メタルハライドランプについてはどの色も比較的良い評価が得られた。高圧ナトリウムランプについては“黄”や“茶”以外はあまり良い評価が得られていない。低圧ナトリウムランプでは，ほとんどの色についてマイナスの値になっていて，評価は非常に悪かった。

2 波長域の蛍光ランプでは，G100，G80R20，G55R45 はなかなか良い評価となった。しかし，R100 では全体的に急に評価が落ち，特に“赤”のカテゴリーについて評価が悪かった。

総合的な評価としては，3 波長域の蛍光ランプは評価が良く，また，2 波長域のものでも R100 以外は評価が良かった。非常に悪かったのは，低圧ナトリウムランプでほとんど色が判別できていなかった。

(矢口博久)

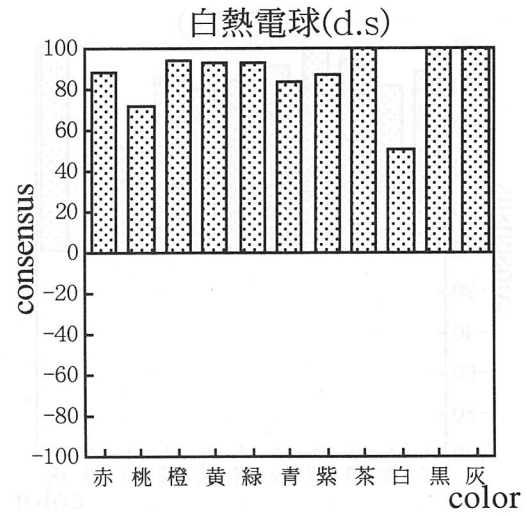
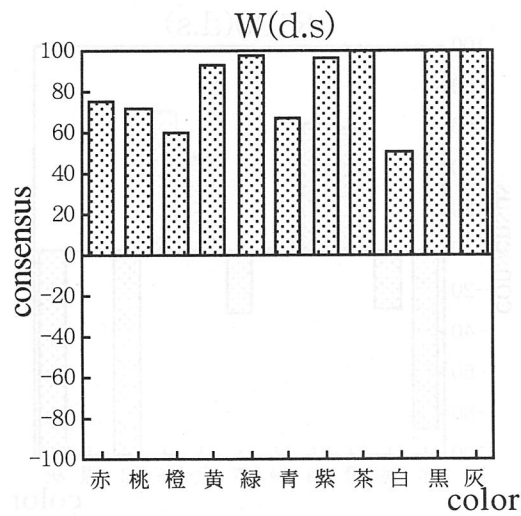
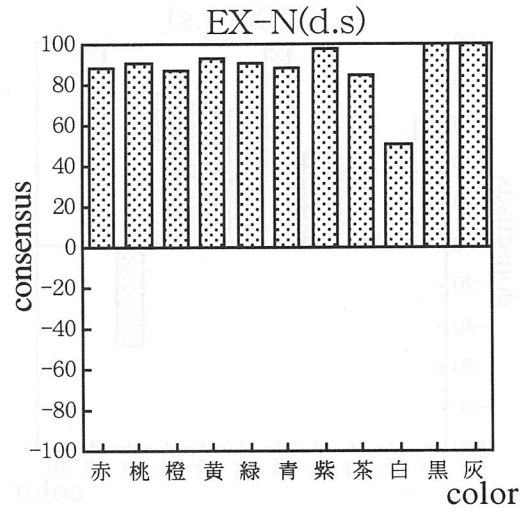
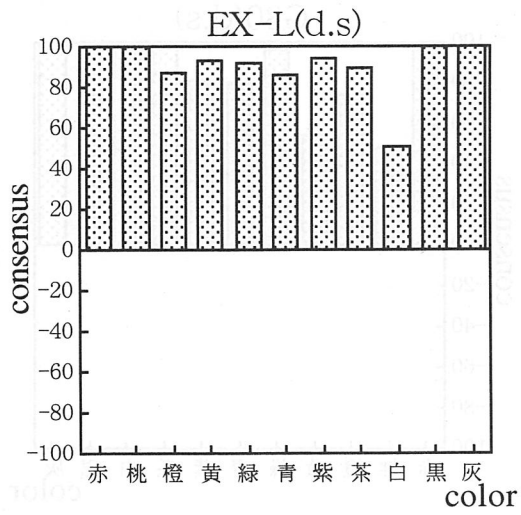


図 5-2-3 : 被験者 d.s の色名別 D65 との一致度

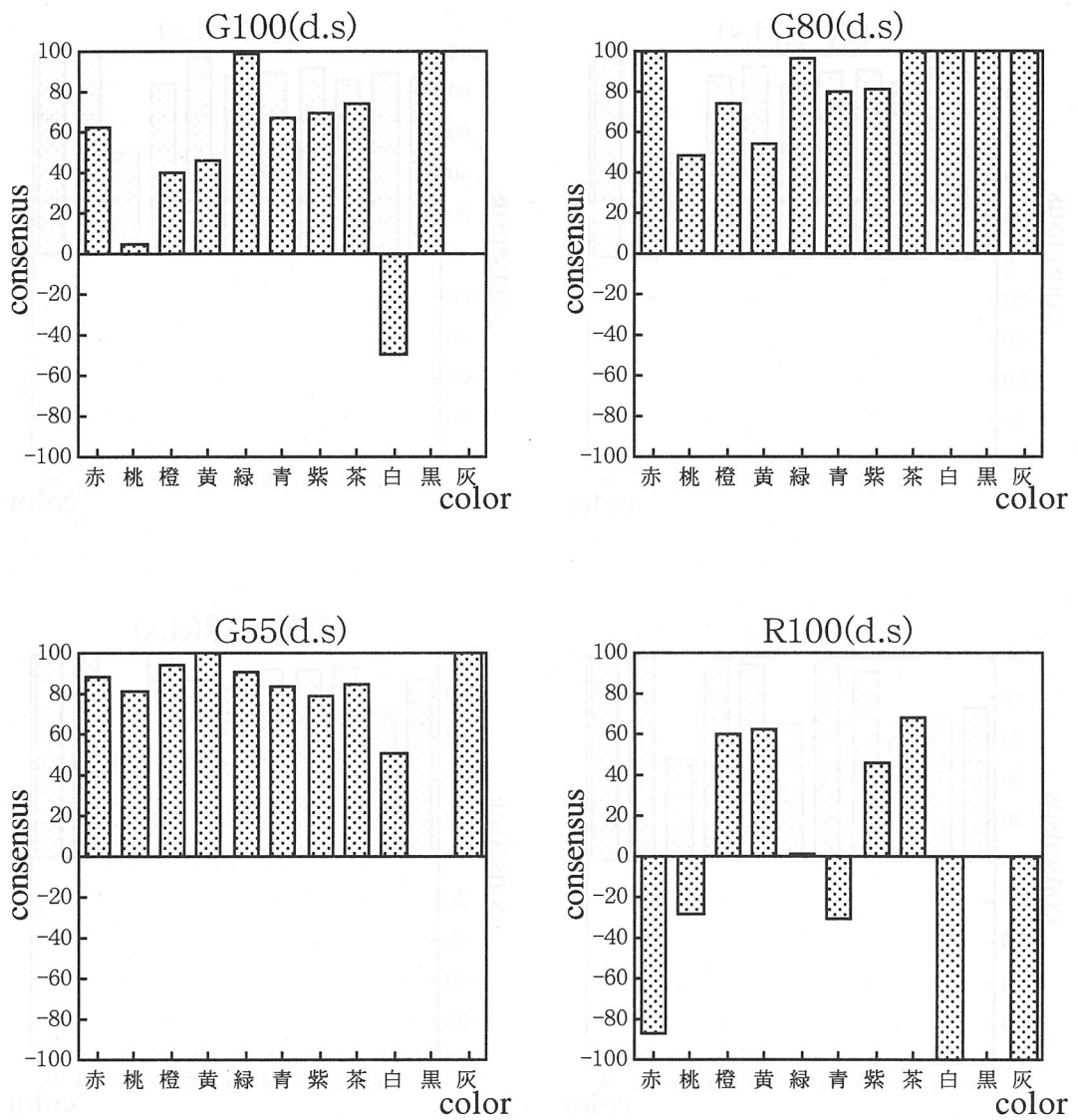


図 5-2-4 : 被験者 d.s の色名別 D65 との一致度

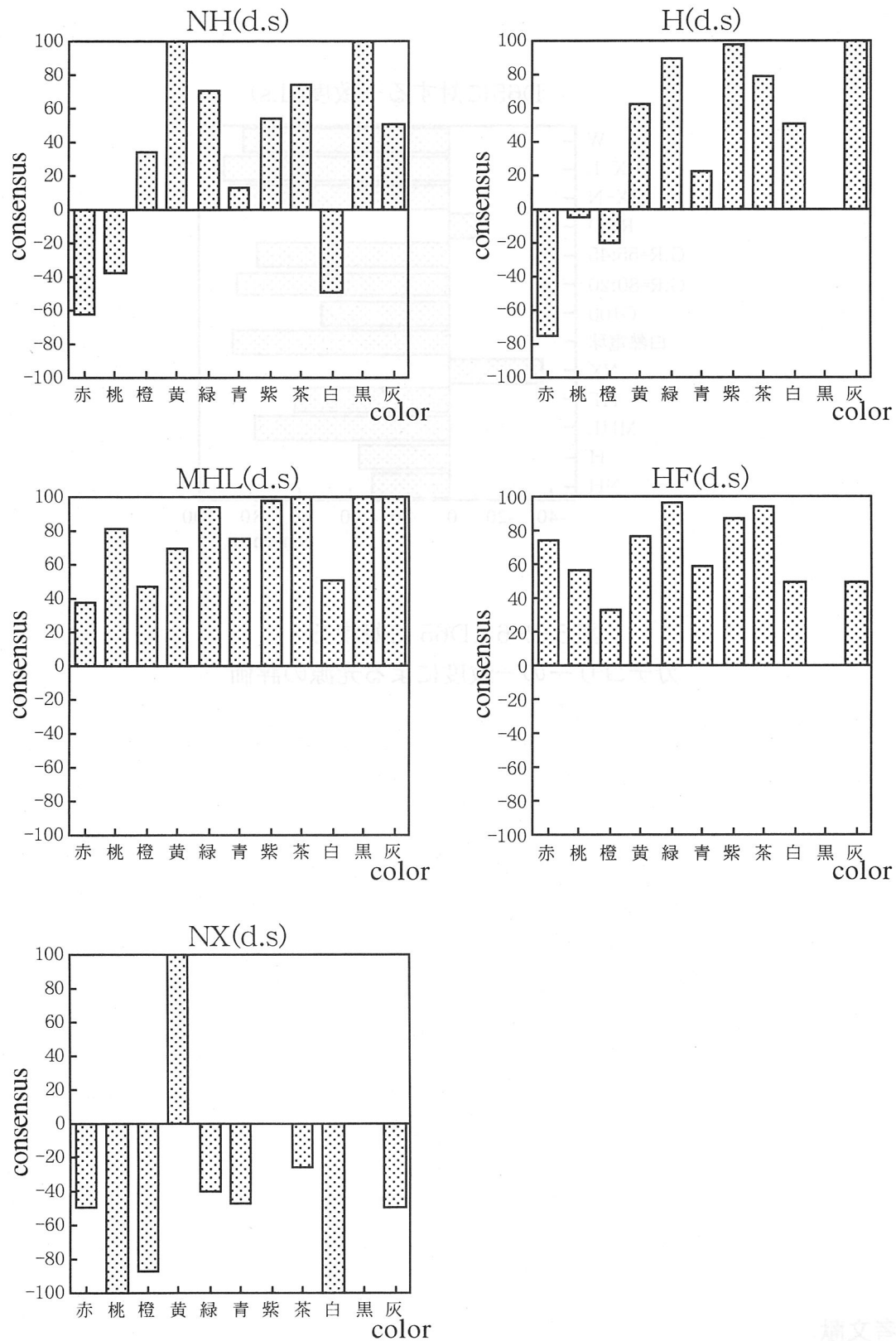


図 5-2-5 : 被験者 d.s の色名別 D65 との一致度

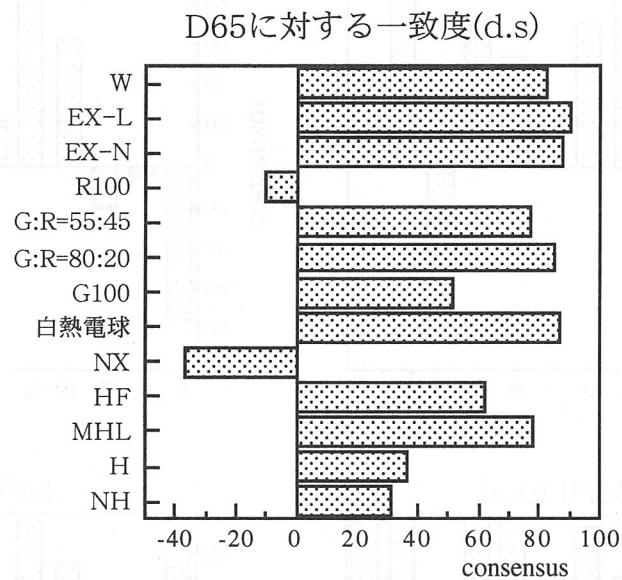


図 5-2-6 : D65 に対する
カテゴリーの一致度による光源の評価

参考文献

- 1) 清水正則・坂本正悦・武内徹二, λ 2 波長域発行形蛍光ランプも, National Technical Report Vol.43 No.2, April. (1997)

5-3 生活環境とカテゴリカル色認識

今日、身近な機器から、オフィス、交通、巨大施設、そして都市に至まで、私たちの生活環境は多様であり複雑である。このような生活環境での行動を安全で円滑なものとするための手段のひとつが色の活用である。すなわち、色によって、多くの要素を分類したり、特定の要素を目立たせたり、ある種の情報を付加するといったことが行われている。交通信号、案内標識、広告看板、色によるラベリング、色による領域区分、操作スイッチやディスプレイにおける配色、配管や配線の色分けなど、全て色による符号化である。すなわち、ここではカテゴリカル色認識の特性が活用されているのである。適正な色彩情報は人と環境との良好なインターフェイスを創り出し、私たちの生活環境をより安全で快適なものとしてくれるだろう。ただし、色は感覚であり、それを認識し行動するのは人である。色彩情報を適正に活用するためには、本報告書で取りあげてきたカテゴリカル色認識の特性はもちろん、人の視覚探索や分類といった行動特性も考慮したデザインが求められる^{1,2)}。

ところで、色情報が探索や分類といった目的で広く活用されているのは、色という属性が有効であるからに他ならない。すなわち、人は色を明確なカテゴリに区別することができ、さらに、それを広い視野範囲から瞬時に見いだすことができる。このようなカテゴリカル色認識の性質によって、色が情報伝達の役割を有効に果たすことができるのである。しかし、色彩情報の有効性は、もちろん無条件に保証されるものではない。それが有効であるためには、色彩情報が意図された色として観察者に正しく認識されることが大前提である。本報告書では、その基礎となる照明環境に応じたカテゴリカル色認識特性について検討してきた。今後、このようなデータがさらに収集され、検討が加えられることによって、照明や観察状況に応じたカテゴリカル色認識データとして確立されるならば、生活環境における色彩情報の設計に寄与するところ大であろう。

さらに、言うまでもなく、これからの生活環境はハンディキャップをもった人であっても、多大な負荷を強いられることなくアクセスできるものでなくてはならない。この観点から、色彩情報の活用については、高齢者の色覚特性や色覚異常者の色覚特性に対する配慮は不可欠なものとなる。本報告書では、カテゴリカル色認識特性の加齢効果の研究を紹介し検討を加えた。今後は、高齢者や色覚異常者など、色覚特性が正常色覚と多少なりとも異なっている人々について、日常的な状況における色の認識特性を把握するための調査・研究³⁻⁵⁾を行い、色彩情報の設計指針として確立していくことも課題になるだろう。

色のカテゴリ一的な特性を生活環境の評価に導入した研究も試みられている。例えば、Ishida⁶⁾は色彩環境における色ターゲットの検出効率の評価モデルを、色カテゴリに基づいた色彩分析によって検討した。まず、色ターゲットの背景となる複雑な色彩環境を色の2次元配列に変換し、各要素の色を11の色カテゴリ（有彩色を8色相、無彩色を3明度）に分類した。そしてこの色カテゴリ情報から、色彩の空間的なならば

り方と多様さを評価する量として、色彩分散度を算出する方法を開発した。複雑な色彩背景下の色ターゲットの探索効率は、ターゲットの類似色領域の数と背景の色彩分散度によって、良好なモデル化が可能であることを示した。また、色彩環境の色カテゴリー分析に基づいて、都市の色彩景観の快適さ、にぎやかさといった視覚的な印象を評価する方法も検討されている^{7,8)}。

(石田泰一郎)

参考文献

- 1) 石田泰一郎: "色情報の活用と有効性", 光学, 26, 246-251 (1997)
- 2) 石田泰一郎: "生活環境における色彩の適正活用とその科学的基盤", 日本印刷学会誌, 34, 370-374 (1997)
- 3) 「高齢者の視覚特性を考慮した照明視環境の基礎検討」照明学会特別研究委員会報告書 (1999)
- 4) 長澤和弘: "2色型第2色覚 (第2色盲) の色覚体験", 眼科, 41, 317-321 (1999)
- 5) 岡島修, 中村かおる, 長澤和弘: "色覚異常者にも見やすいスライド使用色", 臨床眼科, 52, 1215-1218 (1998)
- 6) T. Ishida: "Efficiency in visual search for a color target in a complex color environment", Proceedings of the 8th Congress of the International Colour Association, 1, 143-146 (1997)
- 7) k. Yagi and T. Ishida: "Evaluation of visual comfort of color environment with color mosaic method", Proceedings of the 8th Congress of the International Colour Association, , 247-250 (1997)
- 8) T. Ishida and K. Yagi: "Relationship between visual impression of a city landscape and its characteristics of color", Proceedings of AIC Midterm Meeting, 22-23 June 1999, Warsaw, Poland, , 99-108 (1999)

研究調査委員会報告書の著作権について

本報告書の著作権は（社）照明学会に帰属します。

複写をされる方に

本報告書に掲載された著作物は、政令が指定した図書館で行うコピーサービスや、教育機関で教授者が講義に利用する複写をする場合等、著作権法で認められた例外を除き、著作権者に無断で複写すると違法になります。

