個人の視認能力を考慮した色の三属性の細部識別閾への影響

正会員 秋月有紀（富山大学） 専門会員 井上容子（奈良女子大学）

Effects of Three Color Factors on Recognizable Threshold of Form Perception Taking into Account of Individual Differences of Visual Ability

Member Yuki Akizuki (University of Toyama) and
Fellow Member Youko Inoue (Nara Women's University)

ABSTRACT

Since there is much achromatic information in an actual visual environment, the effect of color on visibility must be considered when estimating the visibility of signs, objects, and lighting in the environments. We investigated the relationship between the recognizable threshold of form perception and three color factors (value, hue and chroma) by conducting an experiment using Landolt's eye chart of 14 color conditions under three levels of background luminance. We measured the individual visual acuity of six subjects in two age groups (young and aged).

When the test chart contrast was more than 0.5, only the value affected the recognizable threshold of form perception; the chroma and hue had no effect regardless of the background luminance or individual visual acuity. Therefore, two concepts defined in our earlier studies, "visual acuity ratio to the maximum level of individual visual acuity" and "relative acuity incorporating individual visual acuity into the target size", hold if the colored target contrast is 0.5 or higher. The concepts do not hold if the target contrast is less than 0.5 because of the effect of color identification.

KEYWORDS : three color factors, recognizable threshold of form perception, visual ability, color identification, individual difference

1. はじめに

実空間に存在する物体には様々な色が用いられており、照明環境条件の変化に伴う色の見えや、色の見えにおける観察者の視認能力の影響について把握することは、実際の明視環境計画を行う上で重要である。

様々な照明環境条件下での色の見えの評価について、実験的に検討した研究報告は数多くある。例えば湯尻¹⁾は、照度レベルが変化する際の表面色の明るさ知覚における色の三属性の影響について検討しており、池田ら²⁾は照明光の分光分布が異なる場合の知覚される色差と測色上の色差との対応について検討している。しかしこれらの既往研究は、色票を用いた物体色そのものの見えについて検討したものであり、視対象の細部識別閾^{註1)}における色の影響については言及していない。

原らの研究³⁾⁴⁾では、文書の読み易さに対する色の三属性の影響について定性的に検討し、有彩色文書の読み易さ評価と同等の評価となる無彩色文書の輝度対比に置き換えることで、色の影響の定量化を試みている。色の条件を系統立てて設定しているため、具体的な設計における利用が可能な有益な知見であるが、読み易さ評価について扱ったものであり、また個人の視認能力の違いについて言及していない。

細部識別閾に対する色の影響について検討した研究として、岩田ら⁵⁾や舟川⁶⁾の報告がある。岩田ら⁵⁾はランドルト環の色が異なる視標を用いて、細部識別閾に対する色の影響を様々な年代の被験者を対象に検討している。しかし視標の色に関する情報が不足しているため、色が細部識別閾に及ぼす影響を定量的に把握することは困難である。また同一年代でも視認能力の個人差が存在するが、そ

のことについては言及していない。舟川⁶⁾は CRT ディスプレイ上の数字と背景の彩度及び色相を変化させ、可読性に対する色彩の影響について視力 1.0 以上の 2 名の被験者実験を行った。しかし輝度対比感度については検討しておらず、細部識別閾に対する色の三属性の相互関係について言及していない。また視対象の提示時間も変数に加えて時間周波数特性における色の分解能への影響についても同時に検討しようと試みている結果、視対象を定常状態で観察するといった空間計画に対して色の取り扱いを考慮するのに、この知見を利用するのは適切でないと考えられる。

観察者の視認能力と色の見えの関係について検討した研究も多い。例えば、佐藤ら⁷⁾や栗木ら⁸⁾は 100 Hue test を用いて加齢による色覚の違いを測定している。しかしこれは色票を同時比較した場合の色の見えについて検討したものであり、細部識別閾における色の影響については検討していない。照明条件と観察者の視認能力を同時に変数として取り扱い、両者の色の見えに対する相互関係について検討した研究報告もある。中山ら⁹⁾は有彩色ランドルト環を用いて、低照度下での視力や色識別能力の違いについて、眼の色の違いによる影響を検討しており、背景とランドルト環の色の組合せによっては眼の色の違いで識別できるランドルト環の大きさが異なることを示している。しかし被験者の属性を表す矯正視力は 0.8～1.5 と幅広く、それら全てを平均しているため、色の見えと観察者の視認能力について言及することは難しい。また彩度と色相の影響が分離できない条件の視標で検討しているため、この知見から色条件の量的変化と細部識別閾との関係を把握することは困難である。

筆者らは個人の視認能力の個人差をランドルト環切れ目幅の細部識別閾で把握し、視対象・照明環境条件（主に明視三要素）に作業者の要因を加えた明視性評価法を構築することを目的として研究を進めており¹⁰⁾⁻¹²⁾、個人の視認能力と視対象寸法を一元化して文書

*本研究の一部は第 11 回(社)照明学会研究・教育助成金によって行われた。

の読み易さを合理的に評価する「相対視力」を提案した¹¹⁾¹²⁾。また視標背景輝度などの環境の変動に伴う個人の細部識別閾は、個人の視認能力の最大値（最大視力）に対する相対値である「視力比」に換算すると、細部識別閾の絶対値で見られた個人差が払拭されて、環境条件と視力比の間には一定の関係が成立することを示した¹⁰⁾。この知見は明視三要素と明視性評価の関係に個人の視認能力という別変数を組み込むにあたり、合理的に取り扱う手法を提供したものである。しかし「相対視力」や「視力比」は現段階では取り扱い範囲が無彩色視対象に限られているため、細部識別閾に対する色の影響及びその個人差について把握しないと、色彩が存在する実空間の明視性評価全般に適用することは難しい。

そこで本報告では紙に印刷したランドルト環視力表を用いて実験を行い、細部識別閾と色の三属性の関係における個人差について定性的に検討する。なお実験で用いる視力表の設定は、背景が白色でランドルト環の色相・彩度・明度が変化する場合（実験1）と、背景とランドルト環が同一色相で両者の彩度と明度の条件が異なる場合（実験2）の二種類として実験を行った。

2. 実験1：背景が白色でランドルト環の色条件が異なる視力表を用いた、細部識別閾と色の三属性の定性的関係

2.1 実験環境

実験室の概要を図1に示す。天井以外の壁面の内装は全て無光沢の白（反射率 82%）であり、天井には調光可能な色検査用 D₆₅ 蛍光灯ランプ 40 W を 60 灯設置している。視標の視力表は被験者の目と視標の中心が同じ高さになるようにして実験室壁面に提示する。被験者の視野中心に設置した視標面の照度分布は様である。被験者に提示する環境条件を表1に示す。視標面照度は 30, 300, 3000 lx の3段階とする。視距離は年齢層毎に設定し、高齢者は加齢による調節力低下に伴う視力低下の恐れがない 5.00 m とし、調節力が十分ある若齢者は 1.25 m とした。

図1 実験室概要
Fig.1 Experimental apparatus.

表1 環境条件
Table1 Conditions of experimental environment.

視標面照度	30, 300, 3000 [lx]
視距離	高齢者=5.00[m]、若齢者=1.25[m]

2.2 被験者

被験者の概要を表2に示す。被験者は高齢者3名（A～C：シルバー人材センター登録者）と若齢者3名（D～F：大学生）である。被験者の視認能力として取り扱う視力は、背景反射率が 74% で輝度対比 0.93 のランドルト環視力表を用い、視標背景輝度 200cd/m² の視力表背景部分を 10 分間正視して明るさに十分順応した後、両

眼自然視で測定した。高齢者の老視に配慮して2種類の視距離で視力測定したが、実験環境での視距離を考慮して、解析には 5m 視力の値を被験者の視認能力として用いる。なお被験者番号 A～F は 5m 視力の昇順に並んでおり、被験者 A～C が高齢者、被験者 D～F が若齢者に該当する。またいずれの被験者も石原式色覚検査で正常であることが確認されているが、100 Hue Test（テスト光源は色検査用 D₆₅ 蛍光灯ランプ、机上面照度 1000 lx）の総エラースコアで見ると、若齢者に比べて高齢者の色識別能力が低いことが示されており、最も 5m 視力が低い被験者 A の総エラースコアは最も大きい。

表2 被験者の属性
Table2 Conditions of subjects.

被験者名	性別	年齢	視距離5m視力		近点視力			石原式色覚検査	100 Hue 総エラースコア
			矯正状態	視力	矯正状態	視距離[m]	視力		
A	男	76	眼鏡	0.95	眼鏡	0.39*	0.97	正常	537
B	男	79	眼鏡	1.29	眼鏡	0.45*	1.55	正常	180
C	男	71	なし	1.46	眼鏡	0.39*	0.99	正常	185
D	女	21	コンタクト	1.49	コンタクト	0.75	1.64	正常	72
E	女	30	コンタクト	1.52	コンタクト	0.75	1.77	正常	3
F	女	21	眼鏡	1.60	眼鏡	0.75	1.77	正常	32

*高齢者の視距離は各人のピントの合う近点距離とした

2.3 視標

2.3.1 視標寸法

細部識別閾の測定にもランドルト環視力表を用いる。提示する視力表は、縦横斜め 45 度の8方向のいずれかに切れ目があるランドルト環を 13 行（視力値 0.15～2.0）×8 列に上から大きい順に配列し、列方向には同じ大きさで切れ目方向が斜めを含む8種類のランドルト環をランダムに配列したものである。ランドルト環を合計 104 個配置した視力表の縦寸法は視角 15 度である。なお視標面照度 30 lx の条件では、視認能力の低い高齢者の細部識別閾が大きくなることが予想されるので、視力値 0.05～0.10 に該当するランドルト環視力表も別途準備した。表3に提示するランドルト環の切れ目幅の設定間隔を示す。

表3 ランドルト環の切れ目幅の設定間隔
Table3 The size of Landolt ring's gaps.

視力値(視距離)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5
高齢者(500cm)	29.1	14.5	9.70	7.27	4.85	3.64	2.91
若齢者(125cm)	—	—	2.42	1.82	1.21	0.91	0.73

視力値	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	2.0
高齢者用	2.42	2.08	1.82	1.62	1.45	1.21	0.97	0.73
若齢者用	0.61	0.52	0.45	0.40	0.36	0.30	0.24	0.18

切れ目幅[mm]

2.3.2 視標の色条件

視標はカラーレーザープリンタとその専用紙（A4、表面光沢なし、背景反射率 74%）を用いて作成する^{注2)}。視標の色条件は標準の光 D₆₅ 光源下での L*a*b*表色系（CIE1976）に基づき、明度 L*と色座標 a*, b*から求める ab クロマ C_{ab}*および ab 色相角 h_{ab}度を設定する。

提示する視標の色条件を表4および図2に示す。背景は白（背景反射率 74%, L*=85）の一定条件とし、ランドルト環の色条件を無彩色（視標 No.1～4）または有彩色（視標 No.5～12）に設定する。色相を変化させる条件は、JIS で規定されている安全色彩に相当する h_{ab}=35°（≒7.5R）、h_{ab}=95°（≒2.5Y）、h_{ab}=175°（≒10G）、h_{ab}=270°（≒2.5PB）とし、その時の明度 L*=50 と C_{ab}*=30 は固定する。明度を変化させる条件では h_{ab}=35°と C_{ab}*=30 を固定する。彩度を変化させる条件では h_{ab}=35°は固定し明度は L*=50 と L*=60 に設定する。各視標の背景部分とランドルト環の輝度対比 C は、測定時の Y 値により式1より算出する。

$$C = \frac{Y_B - Y_T}{Y_B} = 1 - \frac{Y_T}{Y_B} \quad \text{式(1)}$$

C: 輝度対比[-], Y_B: 背景のY値, Y_T: ランドルト環のY値

なお実験結果の表記では、式2を用いて視標面照度に対応する背景輝度に換算する。

$$L = \frac{E \times \rho}{\pi} \quad \text{式(2)}$$

L: 視標背景輝度[cd/m²], E: 視標面照度[lx], ρ: 背景反射率[-]

表4 実験1の視標の色条件

Table4 The test chart color-conditions of the experiment 1.

視標No.	ランドルト環 (L環)	背景とL環の			背景部			
	h_{ab} [度]	L^*	C_{ab}^*	輝度対比	ΔE_{ab}^*	θ [度]	L^*	C_{ab}^*
1	無彩色	23	0	0.94	62	無彩色	85	0
2		50	0	0.72	35			
3		60	0	0.58	25			
4		70	0	0.39	15			
5	35	50	30	0.72	46			
6		60		0.58	39			
7		65		0.5	36			
8		50		60	0.72			
9		60	10	0.58	27			
10	95	50	30	0.72	46			
11	175							
12	270

図2 $L^*C_{ab}^*h_{ab}$ 空間で表した実験1の提示条件(視標 No.1~12)

Fig.2 The test chart conditions of the experiment 1 by $L^*C_{ab}^*h_{ab}$ color space (No. 1-12).

2.4 実験手順

実験開始前は、被験者を各視標面照度に設定された照明環境に10分間順応させる。順応後にある色条件に設定したランドルト環視力表を提示し、同じ大きさで切れ目方向が異なる8つのランドルト環の切れ目方向が、全て正しく識別できる切れ目幅から全て識別できなくなる切れ目幅まで視力測定を行う。そして式3を用いて真の正答率をランドルト環切れ目幅毎に算出し、真の正答率0.8となるランドルト環切れ目幅の最小値を細部識別閾の結果として用いる。

実験は一条件につき3回又は6回実施した(表5)。以後は平均値と標準偏差を用いて結果を示す。

$$P = \frac{NP' - 1}{N - 1} = \frac{8P' - 1}{7} \quad (\because N = 8) \quad \text{式(3)}$$

P: 真の正答率 ($0 \leq P \leq 1$), P': 見かけの正答率 ($P' \geq 1/N$)

N: ランドルト環の切れ目方向数(本実験ではN=8)

表5 条件毎の実験回数(被験者A,C,D,E)

Table5 Number of experimental times (Subject A,C,D,E).

視標No.	視標No.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
視標	30	6	6	6	6	6	3	3	3	6	6	6
面照	300	3	3	3	3	3	-	-	3	3	3	3
度[lx]	3000	6	6	6	6	6	3	3	3	6	6	6

視標No.6の30,3000[lx]条件(表網部)は、被験者A,Cは3回実施
被験者B,Fは全条件3回実施、かつ視標No.7&8はデータ採取せず

2.5 結果1-1: 細部識別閾に対する輝度対比(明度)の影響

視対象の輝度対比は明視三要素の一つであり、色の三属性の明度と関連する。本項では細部識別閾における輝度対比(明度)の影響について視標 No.1~No.7を用いて検討する。なお実験視標の背景は変化せずにランドルト環の明度が増減するので、輝度対比とランドルト環明度とは逆相関の関係にある。

図3は背景とランドルト環の輝度対比と、識別できるランドルト環の切れ目幅の関係を被験者毎に示した結果である。データは平均値および平均値±標準偏差の範囲(図中の上下方向の直線)を扱う。折れ線は無彩色視標結果(No.1~No.4)、プロットは有彩色視標結果(No.5~No.7)であり、それぞれの形状の違いは3種類の視標背景輝度の条件を示している。なお結果を見やすくするため、横軸の輝度対比は線形軸で、縦軸の切れ目幅は対数軸で表現した。

図3 細部識別閾と輝度対比の関係

Fig.3 Relationship between recognizable threshold of form perception and contrast.

図3の無彩色視標の結果では、輝度対比や視標背景輝度が小さくなるほど切れ目幅が大きくなり、また視認能力(表2の5m視力値)の低い被験者ほど、同じ条件での切れ目幅が大きい。この無彩色視

標の結果に対して、同一輝度対比の有色視標の結果がどのように異なるか若しくは一致するかを検討するため、無彩色視標の切れ目幅に対する誤差率を用いる（式4）。同一輝度対比の無彩色視標と有色視標の切れ目幅の違いを誤差率で表現した場合、誤差率が0に近づくほど両者の切れ目幅が同値になることを意味している。式4で取り扱う切れ目幅 S_n と S_c の値は、同一視標の実験施行回数分の結果の平均値とする。なお有色視標 No.7 と同じ輝度対比 0.5 の無彩色視標条件は実験を行っていないため、無彩色視標 No.4 と No.3 の結果（平均値）を直線回帰して、輝度対比 0.5 の無彩色視標の切れ目幅 S_n の値を求めた。

$$ER = \frac{S_c - S_n}{S_n} \quad \text{式(4)}$$

ER：誤差率， S_n ：無彩色視標の切れ目幅[分]， S_c ：無彩色視標と同じ輝度対比の有色視標の切れ目幅[分]

無彩色視標の切れ目幅に対する、有色視標の誤差率について、全被験者結果の累積分布を示した結果が図4である。なお図では被験者や視標背景輝度の違い及び有色視標条件に区別せずに取り扱っている。誤差率はほぼ正規分布をとっており、10-90%タイル値は誤差率 ± 0.08 である。すなわち今回の視標色条件（彩度 $C_{ab}^* = 30$ および色相 $h_{ab} = 35^\circ$ ）においては、色相や彩度は細部識別閾へ影響せず、輝度対比（明度）のみ影響すると考えることができる。

なお、この有色視標の誤差率について被験者毎に区別した結果の統計量を表6に示す。この時、視標背景輝度の違い及び有色視標条件に結果は区別せずに取り扱っている。誤差率の平均値はどの被験者も ± 0.03 と小さく、データのバラツキを示す標準偏差もどの被験者とも同様の数値を示している。すなわち今回の視標色条件において、色の三属性の内輝度対比（明度）のみ細部識別閾に影響するという傾向には個人差はないと考えて差し支えない。

図4 有色視標 No.5～7 と同一輝度対比の無彩色視標との誤差率の累積分布

Fig.4 Cumulative distribution of error rate between recognizable thresholds of chromatic test charts (No.5-7) and achromatic test charts under same contrast conditions.

表6 図4の結果における誤差率の個人毎の統計量

Table6 Statistics values of error rate of each subject in Fig.4.

被験者	データ数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
A	8	0.009	0.063	0.132	-0.090
B	6	-0.001	0.052	0.051	-0.082
C	8	0.028	0.068	0.183	-0.034
D	8	0.010	0.056	0.087	-0.093
E	8	0.016	0.041	0.101	-0.037
F	6	-0.027	0.062	0.025	-0.123

2.6 結果 1-2：細部識別閾に対する彩度の影響

細部識別閾における彩度の影響について、無彩色視標 No.2～No.3 と有色視標 No.5, No.6, No.8, No.9 を用いて検討する。有色視標のランドルト環の色相はいずれも $h_{ab} = 35^\circ$ であり、ランドル

ト環の明度は $L^* = 50$ （視標 No.2, No.5, No.8, 全て輝度対比 0.72）と $L^* = 60$ （視標 No.3, No.6, No.9, 全て輝度対比 0.58）の2種類に固定した上で、彩度が変化するように条件設定した。なお被験者 B と被験者 F は視標 No.8 のデータを採取していない。

図5はランドルト環の彩度 C_{ab}^* と識別できる切れ目幅の関係を被験者毎に示した結果である。データは図3と同様に、平均値および平均値 $\pm$ 標準偏差の範囲（図中の上下方向の直線）を扱う。図中のプロットの形状は視標背景輝度の違いを示す。なお前述図3では、同一輝度対比の無彩色視標と有色視標（ $C_{ab}^* = 30$, $h_{ab} = 35^\circ$ ）の結果が一致していたので、本項では彩度が変化しても細部識別閾は変化しないと仮定し、 $C_{ab}^* = 0$ （無彩色）の切れ目幅の値を直線（ランドルト環の明度 $L^* = 50$ ）又は点線（ $L^* = 60$ ）で示す。

図5より彩度の異なる有色視標データの多くが、同一輝度対比の無彩色視標の結果（直線および点線上）付近に分布していることがわかる。そこで前項と同様に、有色視標と同一輝度対比の無彩色視標の切れ目幅に対する誤差率を用いて、両者の関係について検討する。

無彩色視標の切れ目幅に対する、有色視標（No.5,6,8,9）の誤差率について、全被験者結果の累積分布を示した結果が図6である。この条件での誤差率は前出図4と同様にほぼ正規分布をとっており、10-90%タイル値は誤差率 ± 0.07 であった。すなわち本項の視標色条件（彩度 $C_{ab}^* = 10 \sim 60$ および色相 $h_{ab} = 35^\circ$ ）においても、輝度対比（明度）のみが細部識別閾へ影響すると考えることができる。

図5 細部識別閾と彩度の関係

Fig.5 Relationship between recognizable threshold of form perception and color chroma.

図6 有彩色視標 No.5,6,8,9 と同一輝度対比の無彩色視標との誤差率の累積分布

Fig.6 Cumulative distribution of error rate between recognizable thresholds of chromatic test charts (No.5,6,7,8) and achromatic test charts under same contrast conditions.

表7 図6の結果における誤差率の個人毎の統計量
Table7 Statistics values of error rate of each subject in Fig.6.

被験者	データ数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
A	11	0.007	0.050	0.132	-0.048
B	9	-0.017	0.048	0.051	-0.082
C	11	0.016	0.065	0.183	-0.061
D	11	0.008	0.052	0.087	-0.086
E	11	0.007	0.047	0.101	-0.072
F	9	-0.043	0.074	0.033	-0.160

さらにこの誤差率の被験者毎の統計量を表7に示す。被験者 F 以外の被験者で結果を見ると、誤差率の平均値はどの被験者も ± 0.02 と小さく、標準偏差も同様の数値を示しており、この5名については今回の視標色条件において、色の三属性の内で輝度対比(明度)のみ細部識別閾に影響するという傾向には個人差はないと考えて差し支えない。被験者 F は他者と比べて平均値が低く標準偏差も大きい、視認能力が6名の被験者の中で最も高く、切れ目幅の値そのものが小さいため、視標で設定した切れ目幅の間隔(表3)の粗さが影響して誤差率が大きくなったと考えられる。また被験者 F の結果には切れ目幅と彩度の関係に一貫性が認められず、さらに高彩度視標(No.8)の実験を行っていなかったため、全体の傾向に与える影響は小さいと考えて差し支えない。

以上より、十分な彩度を持つ視標の細部識別閾についても、同一輝度対比の無彩色視標の結果と同等に取り扱うことができ、その傾向には個人差はないと考えることができる。

2.7 結果 1-3: 細部識別閾に対する色相の影響

細部識別閾における色相の影響について、有彩色視標 No.10~No.12 およびそれと同じ輝度対比の無彩色視標 No.5 を用いて検討する。有彩色視標の彩度は $C_{ab}^* = 30$ 、明度は $L^* = 50$ (輝度対比 0.72) に固定されている。

図7は色相 h_{ab} と識別できるランドルト環の最小切れ目幅の関係を被験者毎に示した結果である。データは図3と同様に、平均値および平均値±標準偏差の範囲(図中の上下方向の直線)を扱う。またプロットの形状は視標背景輝度の違いを示す。なお図中の直線は、図3や図4の結果を参考にして色相も細部識別閾に影響しないと仮定し、同一輝度対比の無彩色視標の結果を示したものである。

図7より色相の異なる有彩色視標データの多くが、同一輝度対比の無彩色視標の結果(直線および点線上)付近に分布していることがわかる。そこで有彩色視標と同一輝度対比の無彩色視標の切れ目幅に対する誤差率を用いて、両者の関係について検討する。

無彩色視標の切れ目幅に対する、有彩色視標(No.5, 10~12)の誤差率について、全被験者結果の累積分布を示した結果が図8である。この条件での誤差率は前出と同様にほぼ正規分布をとっており、10-90%タイル値は誤差率 ± 0.07 であった。すなわち本項の視標色条件(彩度 $C_{ab}^* = 30$ および色相 $h_{ab} = 35^\circ, 95^\circ, 175^\circ, 270^\circ$)におい

図7 細部識別閾と色相の関係

Fig.7 Relationship between recognizable threshold on form perception and color hue.

図8 有彩色視標 No.5,10~12 と同一輝度対比の無彩色視標との誤差率の累積分布

Fig.8 Cumulative distribution of error rate between recognizable thresholds of chromatic test charts (No.5,10-12) and achromatic test charts under same contrast conditions.

表8 図8の結果における誤差率の個人毎の統計量
Table8 Statistics values of error rate of each subject in Fig.8.

被験者	データ数	平均値	標準偏差	最大値	最小値
A	12	0.009	0.042	0.089	-0.076
B	12	-0.006	0.059	0.059	-0.133
C	12	0.017	0.064	0.183	-0.039
D	12	0.029	0.033	0.087	-0.002
E	12	0.021	0.034	0.101	-0.010
F	12	0.004	0.035	0.035	-0.077

ても、輝度対比(明度)のみが細部識別閾へ影響すると考えることができる。さらにこの誤差率の被験者毎の統計量を表8に示す。誤差率の平均値はどの被験者も ± 0.03 と小さく、データのバラツキ

を示す標準偏差もどの被験者とも同様の数値を示している。すなわち今回の視標色条件において、色相の異なる視標の細部識別閾についても、同一輝度対比の無彩色視標の結果と同等に取り扱うことができ、その傾向には個人差はないと考えることができる。

2.8 結果 1-4：輝度対比が0.5以上ある、背景白色の有彩色視標の細部識別閾の取扱い

今回の有彩色視標の輝度対比はいずれも0.5以上であり、図3～図8に見られたように、実験範囲の色条件に関わらず輝度対比が等しい視標の細部識別閾は同等であると見なせることがわかった。明視性に大きく影響するのは、明視三要素（背景輝度・輝度対比・視対象寸法）と観察者の視認能力である^{10)・12)}。そこで色条件による違いを区別せずに、視標背景輝度・輝度対比および被験者についてデータを区別し、同一輝度対比の無彩色視標結果と有彩色視標結果を比較したものが図9である。

図より、殆どのデータが10%誤差線内に含まれており、そこから外れているのは全体の僅か3.4%(=4/116)しかない。またそれは各明視要素の大小に関わらず共通している。前出図3～図8の結果も踏まえると、背景が白色の有彩色視標の細部識別閾は、その視標の背景と視対象部分の輝度対比が0.5以上ある場合、無彩色の細部識別閾と同等として取り扱うことができる。

図9 同一輝度対比の無彩色視標と有彩色視標の細部識別閾の比較

Fig.9 Comparison between recognizable threshold on form perception of chromatic object and the one of achromatic object as same contrast.

実空間には、サインを含む印刷物文字情報が至る所に存在しているが、その記載文字の半数は背景と文字が共に無彩色で構成されて

おり、さらに背景が無彩色で文字が有彩色である組み合わせは、全体の約1/4を占めるといわれている¹³⁾。すなわち今回の実験1の視標条件は、実空間の印刷物文字の実状に即したものであると考えられる。また印刷物文字の約8割が輝度対比0.5以上あるといわれており¹³⁾、本論文の知見を踏まえると、実空間の印刷物の明視性は、色彩を考慮せずに輝度情報だけで判定してよいと判断できる。このことは、これまでに我々が提案した「視力比」¹⁰⁾や「相対視力」^{11)・12)}の定義が、色の付いた実空間の印刷物文字（輝度対比が十分あり見やすく設計された文字）に対しても適用できることを意味している。

2.9 細部識別閾に影響を及ぼす、背景とランドルト環の総合的な色対比（色差）と輝度対比の比較

結果1-4までにおいて、背景が白色で視対象の色が変化する条件（輝度対比0.5以上）では、その視対象の細部識別閾は主に輝度対比（明度）で決まることが明らかになった。しかし、色を含む視標について実際に観察者は色の三属性を分解して観察しているものではなく、総合的な色対比として観察している。そこで背景と視標の総合的な色対比を表す色差 ΔE_{ab}^* と輝度対比の二変数で視標の色条件を表現し（色相や彩度については考慮しない）、その時の細部識別閾がどのように変化するか検討するため、視標背景輝度7.1cd/m²での被験者毎の視標No.1～No.12の結果を用いて図10に示す。図の横軸は視標の背景とランドルト環の色差 ΔE_{ab}^* 、縦軸は切れ目幅（平均値）であり、プロットの違いは輝度対比を示す。輝度対比0.58

図10 細部識別閾における色差と輝度対比の関係

Fig.10 Relationship between color difference and contrast in results of recognizable threshold on form perception (7.1 cd/m²).

と 0.72 については複数の色条件で検討しているの、色差が大きくなる方向にプロットを結んで表現している。また被験者 B, F は視標 No.7 および No.8 の条件を試験していない (表 5)。

図より、色差も輝度対比も小さい条件 (視標 No.4) の切れ目幅がどの被験者でも最も大きいことが示されている。また輝度対比 0.5 (視標 No.7) の被験者 A, C, D の結果及び輝度対比 0.93 (視標 No.1) の被験者 A の結果の 4 データを除くと、同じ色差の場合は輝度対比が大きいくほど切れ目幅は小さくなり、輝度対比が一定の場合は色差が増えても切れ目幅が殆ど変化しない傾向がどの被験者にも見られる。除いた 4 データについても大きく矛盾するような結果ではなく、個人内のデータのバラツキを考慮すると問題として取り扱う必要はないと考えられる。すなわち、輝度対比 0.5 以上の有彩色視標の細部識別閾について検討する場合、総合的な色対比情報 (色差) だけでなく輝度対比も把握する必要があることが、改めて確認された。

3. 実験 2 : 背景とランドルト環が同一色相の視力表を用いた、細部識別閾における彩度の影響の一検討

前章では細部識別閾に対する色の三属性の影響について定性的に検討し、輝度対比 0.5 以上の視標の場合は、明度 (輝度対比) が細部識別閾を決定し色相や彩度は殆ど影響しないこと、またそれは視標背景輝度や輝度対比の違いおよび視認能力の個人差に関係しないことを把握した。しかし原等の研究³⁾⁴⁾にもあるように、輝度対比が非常に小さく視認性が悪い条件では、視認性評価に対する色相や彩度の影響が認められている。有彩色視標は無彩色視標と比べて色差が大きくなることを考えると、条件によっては色相や彩度が細部識別閾に影響することは十分想定できる。

本章では背景とランドルト環が同一色相で両者の色差が等しい二つの視標を用いて、細部識別閾における彩度効果を検討する。

3.1 実験環境・被験者・実験回数

実験を行う実験室、環境条件 (視標面照度及び視距離)、被験者は実験 1 と同一である。実験回数はどの被験者も一条件につき 3 回実施した。なお実験 2 では微細な色彩変化について検討するため、全ての被験者について 100 Hue test の色識別能力の測定も行った。100 Hue test の測定環境は前述 2.2 でも示したが、色検査用 D65 蛍光ランプをテスト光源として机上照度 1000lx の条件に設定した。結果を図 11 に示す。縦軸のエラースコアは、3 回実施した結果の平均値を用いている。図より高齢者はどのチップでもエラースコアが高く、特に被験者 A は 100 Hue test の結果も非常に悪

図 11 100 Hue Test 結果
Fig.11 Results of 100 Hue test.

い。一方、若齢者 3 名 (被験者 D-F) の結果は高齢者と比べて非常に低く、十分な色識別能力があることが確認されている。

3.2 視標

細部識別閾を測定するランドルト環視力表の寸法および切れ目幅は実験 1 と同様である。実験時に提示する視標の色条件は、背景とランドルト環を同色相 ($h_{ab}=270^\circ$) 及び同色差 ($\Delta E_{ab}^*=10$) に設定する (視標 No.13~No.14)。提示する視標の色条件を表 9 および図 12 に示す。なお視標 No.13 は輝度対比 0 を目標として作成したが、印刷作成精度の限界により輝度対比 0.04 となっている。

表 9 実験 2 の視標の色条件

Table9 The test chart color-conditions of the experiment 2.

視標 No.	ランドルト環 (L環) h_{ab} [度]	L*	C _{ab} *	背景とL環の輝度対比	ΔE_{ab}^*	背景部 θ [度]	L*	C _{ab} *
13	270	50	20	0.04	10	270	50	30
14		40	30	0.25

図 12 $L^*C_{ab}^*h_{ab}$ 空間で表した実験 2 の提示条件 (視標 No.13~14)

Fig.12 The test chart conditions of the experiment 2 by $L^*C_{ab}^*h_{ab}$ color space.

3.3 結果 2-1 : 色相及び色差が等しい視標の細部識別閾

ランドルト環と背景の色相および両者の色差の値が等しく、その色差を彩度差だけで構成する視標 No.13 と、明度差だけで構成する視標 No.14 を用いて、細部識別閾の結果を比較し図 13 に示す。データは図 3 と同様に、平均値および平均値±標準偏差の範囲 (図中の上下方向の直線) を扱い、プロットの形状は視標を示す。なお参考値として実験 1 で最も輝度対比が小さい視標 No.4 (輝度対比 0.39) の結果も示す。

図より色差が彩度差のみで構成される視標 No.13 の切れ目幅は、色差が明度差のみで構成される視標 No.14 と比べて非常に大きく、背景と視対象の色差における明度と彩度の配分が、視標の視認性に影響することがわかる。特に前出図 11 で 100 Hue test の結果が非常に悪かった被験者 A は 1.9 cd/m² の視標 No.13 の切れ目幅も他者と比べて非常に大きかった。100 Hue test は色相弁別について測定するものであるが、今回の細部識別閾の結果の個人差の違いと良く対応していた。

図13 色差が等しい2視標での細部識別閾に対する明度差と彩度差の関係
Fig.13 Relationship between value-difference and chroma-difference in the results of recognizable threshold on form perception of same-color- difference test chart ($\Delta E_{ab}^*=10$).

3.4 結果 2-2: 細部識別閾に対する彩度効果

前出図13の結果を用いて、色差 $\Delta E_{ab}^*=10$ の視標の細部識別閾における彩度効果を把握するため、2つの視標の細部識別閾の比で表して検討する(式5)。

$$TR = \frac{T_{chroma}}{T_{value}} = \frac{\frac{1}{S_{chroma}}}{\frac{1}{S_{value}}} = \frac{S_{value}}{S_{chroma}} \quad \text{式(5)}$$

TR: 細部識別閾への明度効果に対する彩度効果,
Tvalue: 色差が明度だけで構成されている視標 (No.13) の細部識別閾,
Tchroma: 色差が彩度だけで構成されている視標 (No.14) の細部識別閾,
Svalue: 色差が明度だけで構成されている視標での切れ目幅[分],
Schroma: 色差が彩度だけで構成されている視標での切れ目幅[分]

細部識別閾における明度効果に対する彩度効果(式5のTR)と背景輝度および個人の視認能力(5m視力値)との関係を示したものが図14である。図の縦軸は明度の視認性に対する彩度の視認性の効果を意味しており、明度と彩度の効果が同等の場合は1をとる。

5m視力値が高く100 Hue testの結果も問題ない若齢者3名(被験者D-F)では、この視標条件における彩度効果は、明度のそれに比べ0.1倍~0.2倍であり、それは背景輝度1.9~190 cd/m²の範囲では変わらないことが示されている。一方、5m視力値が低く、100 Hue testの結果も良くなかった高齢者3名(被験者A-C)では、細部識別閾に対する彩度効果は0.08倍以下と低く、かつ背景輝度が低いほど彩度効果も小さくなることが示されている。さらに5m視力がほぼ等しかった被験者Cと被験者Dの結果をみると、

無彩色視標での視認能力(表2の5m視力)がほぼ等しいが、100 Hue Testで見られたような色識別能力の違いが、細部識別閾への彩度効果の違いに現れたものと考えられる。なお小松原らの研究¹⁴⁾によると、色差 $\Delta E_{ab}^*=10$ の条件で知覚色差についてクロマ差が明度差の約0.5倍であることが示されている¹⁵⁾。本報告の結果がその値より小さいのは、小松原らと実験手法が異なることが影響していると考えられる。

すなわち今回の視標条件(背景とランドルト環の色相 $h_{ab}=270^\circ$ 、色差 $\Delta E_{ab}^*=10$ 、輝度対比0.25と0.04)において、細部識別閾への彩度効果は被験者の色識別能力に影響することが示された。十分色識別能力がある被験者の場合は、彩度効果が同等であると考えられる(図14より彩度効果が明度効果の1割程度と考えられるが、この結果には輝度対比0.04の影響が含まれているので、実際にはこの数値より小さくなる)。色識別能力が低い被験者の場合は、個人の色識別能力によって彩度効果が大きく異なり、更に視標を観察する照明環境(背景輝度)によっても彩度効果が異なると考えられる。これらの結果は、これまでに我々が提案した「視力比」¹⁰⁾や「相対視力」¹¹⁾¹²⁾の定義には適用範囲があることを示唆しており、輝度対比が非常に低く色を含む視対象の明視性を評価する場合は、視力比や「相対視力」の取扱いに注意を要し、色識別能力を考慮する必要があるといえる。

図14 個人の視認能力(5m視力)と細部識別閾に対する彩度効果の関係
Fig.14 Relationship between the individual visual acuity and the effect of chroma to recognizable threshold on form perception of same-color- difference test chart ($\Delta E_{ab}^*=10$).

4. おわりに

本報では細部識別閾に対する色の影響およびその個人差について定性的に検討するため、ランドルト環視力表を用いた2種類の実験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 視標背景が白色で視対象の色が変化する条件において、背景と視対象の輝度対比が0.5以上ある場合、彩度と色相は細部識別閾に影響しないため、視対象の明視性を評価するのに明度(輝度対比)のみ考慮すればよい。また総合的な色対比である色差と輝度対比を比較すると、同一輝度対比で色差が変化しても細部識別閾に大きく影響しないが、同一色差で輝度対比が変化すると細部識別閾は変化するため、有彩色視標の細部識別閾について検討する場合、色差だけでなく輝度対比も把握する必要がある。
- (2) 上記1の関係は、背景輝度や観察者の視認能力の違いに関係なく成立する。
- (3) 視標の背景と視対象の色相および色差が等しい視標条件(背景とランドルト環の色相 $h_{ab}=270^\circ$ 、色差 $\Delta E_{ab}^*=10$ 、輝度対比0.25と0.04)において、十分色識別能力がある被験者の細部識別閾における彩度効果は同等であるが、色

識別能力が低い被験者の場合は色識別能力によって彩度効果が大きく異なり、さらに視標を観察する照明環境（背景輝度）によっても彩度効果が異なる。

- (4) これまでに我々が提案した「視力比」や「相対視力」を色のある視対象の明視性評価に利用する場合には、適用範囲が存在する。実空間に存在する有彩色印刷物文字のように輝度対比が 0.5 以上の視対象の明視性を評価する場合は問題なく適用できるが、輝度対比が非常に低い視対象の明視性を評価する場合は、取扱いに注意を要する。

なお本報では実験視標の作成に限界があったため、十分な色条件について検討することはできなかった。特に 3 章の検討内容については、視標媒体を変えるなどの工夫を行い、様々な色差条件についても検討する必要があると思われる。

当時卒論として本研究に携わった当時奈良女子大学人間環境学部 4 回生の北澤いくみ氏および筒井靖子氏に感謝申し上げます。

注釈

- (1) 本論文において、照明環境下でランドルト環の切れ目方向や文字が識別できる閾値のことを細部識別閾（recognizable threshold of form perception）と定義する。この細部識別閾は、識別される最小寸法・最小輝度対比・最小視標背景輝度などで表されるが、本論文では、ランドルト環の最小切れ目幅（視角：分）で取り扱う。
- (2) 実験視標となるランドルト環視力表は印刷機で作成するが、用紙の印刷位置によってランドルト環の色ムラについて検討するため用紙一面に実験条件の色を印刷し、縦 8 分割×横 7 分割にした計 56 ブロックの各中央部について測色したところ、色ムラは 10%以内であったため、実験に支障がないものと判断した。

参考文献

- (1) 例えば、湯尻照：照度レベルによる表面色の明るさの変化－色相、明度、彩度の影響－，照学誌，74・10，pp.668-673（1990）。
- (2) 池田紘一，中山昌春，小原清成：等明度・高彩度色票の測色上の色差と知覚される色差との対応，照学誌，66・4，pp.138-143（1982）。
- (3) Naoya HARA, Ichiro NAMBA and Tarow NOGUCHI : Equivalent Luminance Contrast Representing the Relationship between Color Difference and Readability of Chromatic Documents , Journal of Light & Visual Environment, Vol.27, pp.165-171（2003）。
- (4) 原直也，野口太郎：無彩色背景有彩色文書の文字の明度，彩度，色相が読みやすさと等価輝度対比に及ぼす影響，照学誌，88・11，pp.866-873（2004）。
- (5) 岩田三千子，中根芳一：有彩色視標の視認性に及ぼす加齢の影響について－黒と有彩色－，日本生理人類学会雑誌，13・3，pp.137-143（1994）。
- (6) 舟川政美：色コントラストと可読性に関する実験研究，照学誌，88・11，pp.799-808（2000）。
- (7) 佐藤千穂：加齢に伴う色の見えの変化，照学誌，82・8A，pp.530-537（1998）。
- (8) 栗木一郎，石井渉，内川恵二：加齢による水晶体黄変が色覚に及ぼす効果，照学誌，84・2，pp.107-116（2000）。
- (9) 中山和美，乾正雄，佐藤仁人，國友美希：低照度下における，目の色の違いによる視力と色の識別能力の差異の検討，照学誌，84・2，pp.100-106（2000）。

- (10) 秋月有紀，井上容子：個人の最大視力に対する視力比の概念の導入－個人の視力に配慮した視認能力評価における視標背景輝度と視距離の影響の取り扱いについて－，照学誌，56・11，pp.1-11（2002）。
- (11) Youko INOUE, Yuki AKIZUKI : The Optimal Illuminance for Reading-Effects of Age and Visual Acuity on Legibility and Brightness-, Journal of Light & Visual Environment, Vol.22, pp.23-33（1998）。
- (12) 秋月有紀，井上容子：明視性評価における年齢の取り扱い及び相対視力の適用範囲に関する検討，日本建築学会計画系論文集，第 562 号，pp.15-22（2002）。
- (13) 秋月有紀，井上容子，岩田三千子，原直也：施設内に存在する標示物の明視性の把握 標示物の明視性に関する実態調査（その 3），日本建築学会全国大会学術講演梗概集 D-1 環境工学 I，pp.441-442（2002）。
- (14) 小松原仁，平井敏夫，島善一郎：物体色による色差評価(1)，色彩研究，29(2)，pp.13-20（1982）。
- (15) 日本色彩学会編：新編色彩ハンドブック第 2 版，東京大学出版会，p.279（1998）。

（受付日 2007 年 6 月 11 日／採録日 2007 年 12 月 7 日）

秋月 有紀（正会員）

富山大学人間発達科学部人間環境システム学科
〒930-8555 富山県富山市五福 3190
1970 年生まれ。2003 年奈良女子大学大学院人間文化研究科博士後期課程修了，博士（学術）。
松下電工株式会社，京都大学防災研究所研究員，立命館大学 COE 客員研究員などを経て，2007 年 4 月富山大学人間発達科学部准教授，現在に至る。照明学会，日本照明委員会，日本建築学会，日本火災学会，International Association of Fire Safety Science，日本都市計画学会 等会員。

井上 容子（専門会員）

奈良女子大学生生活環境学部住環境学科
〒630-8506 奈良市北魚屋西町
1954 年生まれ。1984 年大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻博士課程単位取得退学，工学博士。
現在，奈良女子大学生生活環境学部教授。照明学会論文賞，照明学会関西支部賞などを受賞。視環境計画を専門とし，現在は明視性評価，適正照度，非常用照明・防犯照明，有彩色光照明などの研究教育に従事。照明学会，日本照明委員会，日本建築学会，日本家政学会，日本人間工学会，日本色彩学会 各会員。