

研究

知覚潜時の波長依存性

山下 由己男

製品科学研究所人間工学部 〒305 茨城県筑波郡谷田部町東 1-1-4

(1984年3月29日受理)

Wavelength Effect on Perceptual Latency

Yukio YAMASHITA

Department of Human Factors Engineering, Industrial Products Research Institute,
1-1-4, Yatabe-machi Higashi, Tsukuba-gun, Ibaraki 305

Perceptual latency of monochromatic lights was examined to study the relationship between chromatic saturation and latency in the chromatic channels. With the perceived order judgments of two stimuli presented in hue substitution, the perceptual latency in three levels of retinal illuminance (10, 32, 100 td) was measured. The results show that the relative perceptual latency to the standard stimulus (629 nm, 32 td) increases with the decrease in retinal illuminance. The increment of latency is larger in the middle wavelength region (500-600 nm), particularly about 570 nm, than in the short and long regions. The perceptual latency is considered to be the time required by the response of the chromatic channels to reach the purity discrimination threshold, which is equivalent to saturation. It is found that the relation between the latency and the purity discrimination threshold in three levels of retinal illuminance is indicated by a simple expression, and the influence of retinal illuminance on the wavelength effect of the latency is represented by different values of the coefficients in the expression.

1. はじめに

視覚系には輝度チャンネルと色チャンネルがある^{1,2)}。輝度は一定なままで色相だけが変化するような光刺激が与えられると、輝度チャンネルの応答は変化せず、色チャンネル応答にのみ変化が生ずる。そのため、この色の変化は色チャンネルだけを介して検出されることになる。このような刺激提示法は色相置換法 (hue substitution technique)^{3,4)}と呼ばれ、色チャンネル応答を調べる有力な手段となっている。

色相置換によって刺激を提示したとき、色の変化が知覚されるまでには時間遅れがある。この遅れ時間、すなわち知覚潜時は色チャンネル応答の時間特性を反映している。これまでも、色相置換法により、仮現運動⁴⁾、知覚同時性^{3,5)}、反応時間⁶⁾、2パルス分解能^{7,8)}、提示時間閾 (duration threshold)^{9,10)} などから色チャンネルの応答特性が調べられている。それらの結果から指摘される主要な点は、知覚潜時あるいは提示時間閾の長さが波長

に依存しており、その波長依存性が色の飽和度 (saturation) と関連していることである^{5,6)}。すなわち、置換される単色光が飽和度の高い波長の場合には知覚潜時が短く、飽和度が低い波長では知覚潜時が長くなる。単色光の飽和度とは、明るさ感覚への色チャンネルの寄与とされるように、色チャンネル応答の大きさに対応している¹¹⁻¹³⁾。したがって、知覚潜時の波長依存性は色チャンネル応答の波長依存性に関連していると考えられる。

ところで、色相置換の知覚潜時とは、白色が他の色に変わったことが検出されるまでの時間と考えることができる。すなわち、色相置換の瞬間から色チャンネル応答がしだいに増大し、色弁別閾を越えるときに色の変化が検出されるとし、それまでに要する時間が知覚潜時であるとする。この白色の色弁別閾は純度弁別閾^{14,15)}として知られており、これはまた、飽和度関数に対応している。そのことが、知覚潜時と色の飽和度の関連として示されていると考えられる。

そこで、本研究では、3段階の網膜照度において、色

相置換法を用いて知覚潜時を求め、それらの波長依存性と純度弁別閾との関係について検討した。

2. 方法および実験装置

2.1 実験方法

提示視野を Fig. 1(a)に示す。直径 8° 円形の白色背景視野の中に、直径 1° の二つの円形テスト視野 (A, B) を中心間距離 2° で上下に配置した。二つのテスト視野の間には長さ約 30' の棒状固視点を設けた。このような視野をマックスウェル視 (人工瞳孔 2mm 直径) で被験者の右眼に提示した。網膜照度は、10, 32, 100 td の 3 段階とし、基準となる網膜照度を提示視野の上半円に設定した。

5 分間の暗順応ののち、最初に刺激条件設定を行なった。被験者はまず、白色背景視野の下半円の明るさを上半円と等しくし、次に、テスト視野の白色の明るさを直接比較で、それぞれの周辺視野と等しくした。最後に、交照法 (8~15 Hz) を用いて、テスト視野に提示される色光をそのテスト視野の白色光と等輝度にした。刺激条件設定および以下の実験を、被験者は固視点を見つめながら行なった。

色相を置換するためにソレノイドシャッターを用いたため、そのシャッター音が聞こえないように被験者には白色雑音 (約 50 dBSL) を聞かせた。白色雑音の提示開始から 1 秒以上経過したのち、被験者自身がスタートボタンを押すと、それから 200 ms を中心として、ある時間間隔 (stimulus onset asynchrony; SOA) をおいて、テスト視野の色が白色から単色へ輝度一定のまま入れ替えられた (Fig. 1(b))。被験者は、テスト視野 A と B での色相変化の順序を判定し、スイッチを用いて応答した。判定は三件法で行ない、(イ) A が先、(ロ) B が先、(ハ) A, B 同時のいずれかが選択された。応答があったとき、および色光提示後 2 秒経過しても応答のない場合には、テスト視野を白色に戻し、白色雑音も止めた。テスト視

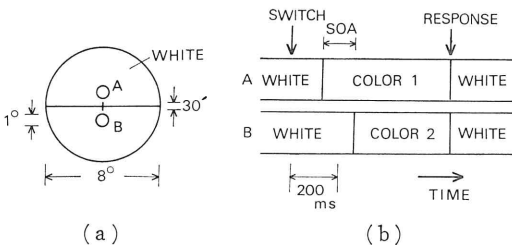


Fig. 1 Schematic illustration of the stimulus presentation. (a) visual field of stimuli, (b) hue substitution procedure.

野 A と B の一方には必ず、標準波長 629 nm の単色光を提示し、もう一方にテスト波長の単色光を提示した。SOA の符号を、標準波長光に対しテスト波長光を先に提示する場合を正、逆の場合を負として、-50 ms から 50 ms まで、10 ms ステップの 11 段階の SOA を用いた。この SOA の範囲は両端の SOA で (ハ) の同時判定がなくなるように決めた。潜時の長さによっては、SOA の範囲を 20 ms だけ正あるいは負の側に移動した。各 SOA は無作為順序で提示され、各 SOA について 11 試行、合計 121 試行を 1 セッションとした。一つのテスト波長について、標準波長がテスト視野の上側にある場合と下側にある場合の各 1 セッションの結果を合計し、そのうち、(ハ) の同時判定の度数分布の算術平均を求め、テスト波長の知覚潜時とした。同時判定の度数はどのテスト波長においても約 100 回であった。

白色の CIE xy 座標は、背景視野 $x=0.327, y=0.372$, テスト視野 $x=0.305, y=0.355$ であった。テスト波長として、431 nm から 655 nm までの 12 種 (干

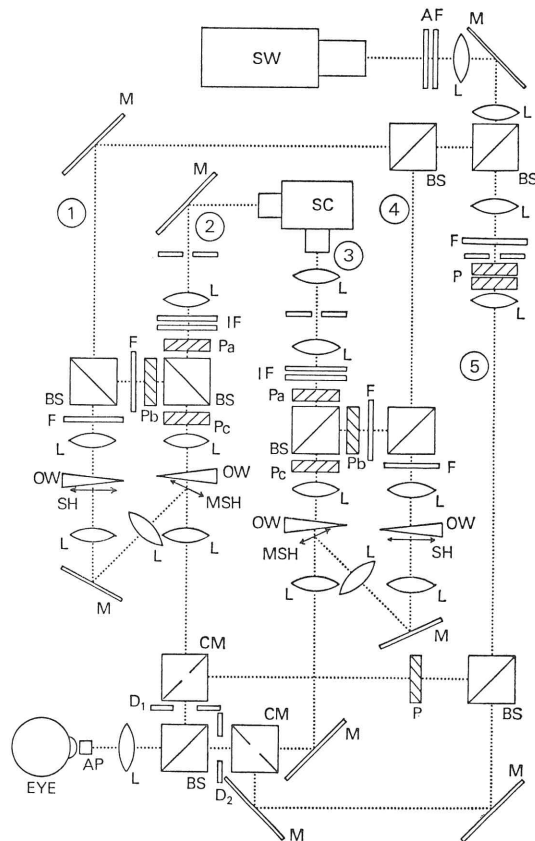


Fig. 2 Schematic diagram of the optical system. Details in text.

渉フィルタと色ガラスフィルタの組合せのピーク波長)を用いた。

被験者は男性2名(NS, YY)で色覚は正常であった(石原式色盲検査表)。YYは視力を矯正した。

2.2 実験装置

Fig. 2に示す5光路マックスウェル視光学系を用いた。これは、一対のテスト視野用光路(光路1および2と3および4)と背景視野用光路(光路5)から構成されており、光源として、白色用(SW)と色光用(SC)の二つのキセノン光源(500W)を用いている。

テスト用光路において、光源からの光は白色光、色光ともにソレノイドシャッターMSHの2mm直径アパーチャーに集光される。シャッターの遮光羽根には表面鏡(約5mm角, 0.3mm厚)が貼られており、シャッターが開いているときには直進光、閉じているときには鏡による反射光が眼のほうへ導かれる。光路の切換えは立上り時間約1msで行なわれる。シャッターMSHからの光は、アパーチャーCMを通過する。これは、中心部分のみが楕円状に透明になった鏡で、シャッターMSHからの光はその透明部分を直進する。一方、その周辺の鏡の部分では光路5からの背景視野光が反射される。これらの光は、さらに半円形のアパーチャーD₁およびD₂によって、それぞれ視野の下半円と上半円となる。光の輝度は回転ウェッジ(OW), 中性フィルター(F), あるいは偏光板(P)によって調整される。単色光の提示には干渉フィルタが用いられる。なお, Fig. 2の実験装置は偏光板P_a, P_b, P_cによってテスト色光の色純度を変えることができるように設計されている。すなわち、偏光板P_a, P_bは偏光方向を互いに直交して固定されており、偏光板P_cの回転方向を調整することによって、P_cを通過する混色光に含まれる単色光(P_a通過光)と白色光(P_b通過光)の比率を変えることができる。本研究では単色のテスト光のみを用いるため、P_bの通過光は遮光されている。

3. 実験結果

標準波長629nmに対する相対潜時を網膜照度10, 32, 100tdについて、それぞれ、T₁₀, T₃₂, T₁₀₀と表わす。Fig. 3に結果を示す。潜時の正符号は標準波長光の潜時よりもテスト波長光の潜時のほうが長いことを示し、負符号はその逆を示す。各点の棒は平均の標準誤差である。知覚潜時の波長依存性を異なる網膜照度間で比較すると、500nm以下および600nm以上の波長範囲では網膜照度によらず、T₁₀, T₃₂, T₁₀₀ともにほとんど一致

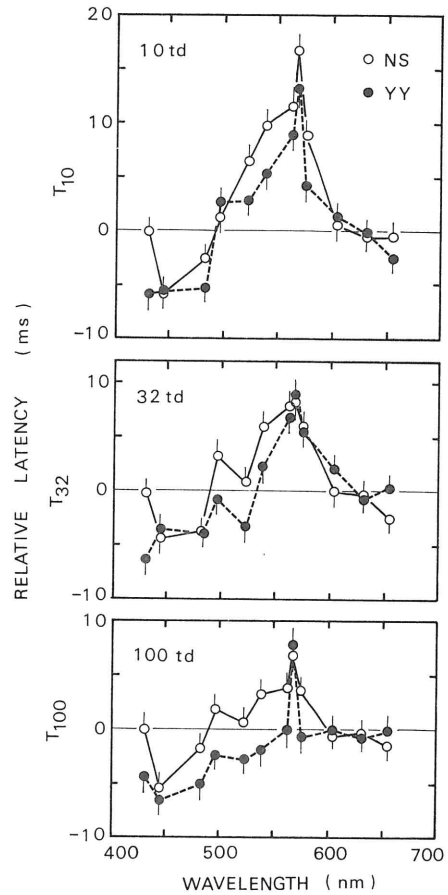


Fig. 3 Wavelength effect of relative perceptual latency to the standard wavelength stimulus (629 nm). Error bar shows the standard error of mean.

しており、一方、500nmから600nmの範囲では網膜照度が低くなるにつれて潜時が長くなっている。

次に、T₁₀, T₃₂, T₁₀₀の相対的關係を知るため、標準波長に近い631nmについて、10, 100tdでの潜時を32tdの標準波長629nmに対する相対値として求めた。これは、Fig. 1(a)の提示視野の上下半円の一方をテスト視野、背景視野ともに32tdに設定して標準波長光を提示し、もう一方の半円を10あるいは100tdにすることによって行なった。Fig. 4にその結果を示す。

Fig. 3とFig. 4に示された結果から各被験者ごとに、すべての網膜照度での知覚潜時をT₃₂として示したのがFig. 5である。各点が被験者の結果を示し、折れ線は2名の被験者の平均を結んでいる。

知覚潜時の波長依存性に及ぼす網膜照度の影響をみる

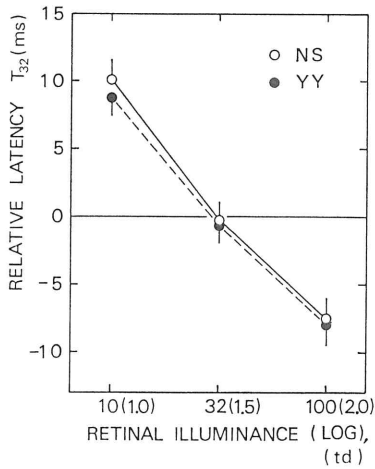


Fig. 4 Perceptual latency of 631 nm light relative to the standard wavelength stimuli (629 nm) of 32 td as a function of retinal illuminance.

ため, **Fig. 5** を波長ごとに網膜照度と相対潜時の関係としてプロットしなおしたのが **Fig. 6(a)**である. 網膜照度の対数と T_{32} の間にはどの波長についても, ほぼ直線関係がみられる. そこで, その関係に次の一次式を最小自乗法を用いてあてはめた.

$$T_{32} = -a_{\lambda} \log L_0 + b_{\lambda} \quad (1)$$

ここで, L_0 は刺激光の網膜照度である. 式(1)の係数

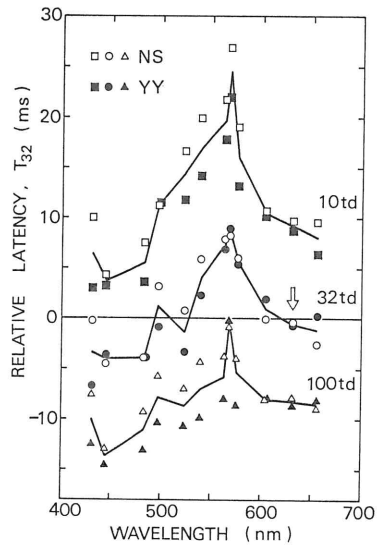
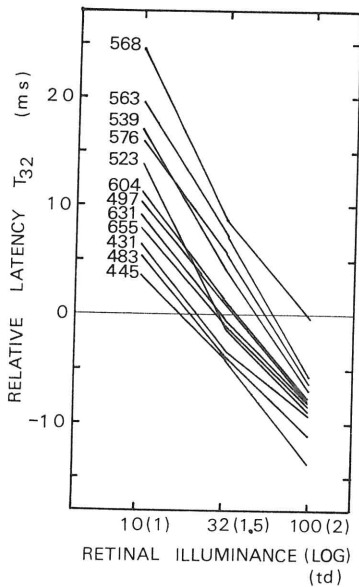
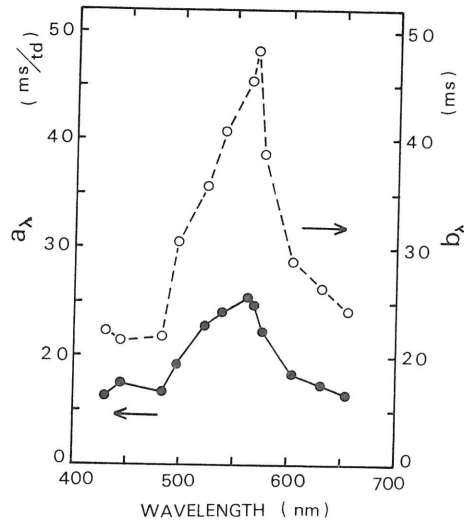


Fig. 5 Wavelength effect of relative perceptual latency to 629 nm light of 32 td.

a_{λ} , b_{λ} を **Fig. 6(b)**に示す. a_{λ} は潜時が網膜照度に伴って変化する割合を示し, b_{λ} は網膜照度 1td の相対潜時に相当している. a_{λ} は 500 nm 以下および 600 nm 以上の波長では標準波長 629 nm の場合とほぼ同じであるのに対し, 500 nm から 600 nm の範囲では標準波長よりも大きく, とくに 570 nm 付近で最も大きい. これ



(a)



(b)

Fig. 6 Relation between the perceptual latency and the retinal illuminance. (a) relative latency for each wavelength stimulus as a function of retinal illuminance, (b) values of the coefficients of the expression (1).

は、Fig. 3 についても述べたように、中波長範囲のテスト波長では、他の範囲の波長に比べ、網膜照度が低下したとき、潜時の長くなる割合が大きいことを示している。

4. 考 察

本研究では、629nm 標準波長光に対する順序判定によってテスト波長光の知覚潜時を求めた。一方、Bowen⁵⁾は、クリック音 (100 μs 持続時間) を標準刺激として同時性判定により色相置換の onset 潜時を測定した。輝度条件は自然視 1.88 cd/m² で、これは網膜照度約 32 td に相当している。そこで、Bowen の報告に示された、2名の被験者の平均値と、Fig. 5 の 32 td の結果とを比較する。Fig. 5 の結果を 568 nm 光の潜時に対する相対値として書き直して、Bowen の結果とともに Fig. 7 に示す。縦軸のスケールは彼の結果に比べ、3.8 倍されている。このスケールの違いの原因は明らかでないが、潜時の波長依存性に関しては、Fig. 7 の両者の結果はよく似ている。

また、潜時に及ぼす網膜照度の影響について、Litra¹⁶⁾は、明所視レベルから暗所視レベルまで広い網膜照度範囲で色光に対する反応時間を測定した。彼らの結果では、明所視レベルで色の違いによる反応時間の相違は見られないが、網膜照度が低くなるに伴って反応時間が長くなることが示されている。このとき、網膜照度の対数と反応時間の関係は広い網膜照度範囲では直線ではない。本研究で得られた、網膜照度の対数と潜時の間の直線関係は、彼らの結果を考慮すると、10 td から 100 td までの比較的狭い網膜照度範囲での近似的な関係を示していると思われる。

次に、知覚潜時を色チャンネル応答の面から考察する。

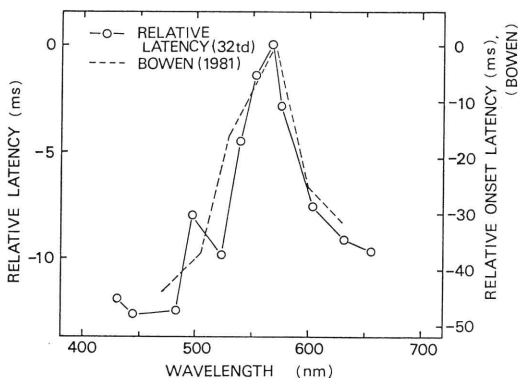


Fig. 7 Comparison between the latency (32 td) of the present study and Bowen's data.

色相置換の瞬間から、色チャンネル応答が時間とともに増大し、この色チャンネルの応答の大きさが白色の色弁別閾のレベルを越えるときに色の変化が検出されると考える。すなわち、色相置換の瞬間から色の変化が検出されるまでにはある時間が必要であり、これが潜時であるとする。

白色の色弁別閾は純度弁別閾として知られ^{14,15)}、これは次のように定義される¹⁷⁾：

$$\Delta p_c(\lambda) = \Delta L(\lambda) / L_o \quad (2)$$

ここで、 $\Delta p_c(\lambda)$ は純度弁別閾、 L_o は刺激光輝度、 $\Delta L(\lambda)$ は、純度弁別閾での色光に含まれる主波長 λ の単色光成分の輝度である。以下では光強度を輝度ではなく網膜照度で表わす。網膜照度 L_o のうち、主波長成分の網膜照度を L_r とすると、網膜照度 L_o を一定に保ったまま、白色と主波長成分の比率を変え、白色から主波長成分を少しずつ増し、 L_r が $\Delta L(\lambda)$ に達したとき色の変化が弁別される。 $\Delta L(\lambda)$ は色チャンネル応答の色弁別閾に対応する物理量であり、これを検出閾値と呼ぶことにする。

Fig. 8 は、Fig. 5 の被験者 2 名の相対潜時の平均値を縦軸方向に、一方、式(2)から求めた波長 λ の検出閾値の対数、 $\log \Delta L(\lambda)$ を横軸方向にとって書き直した

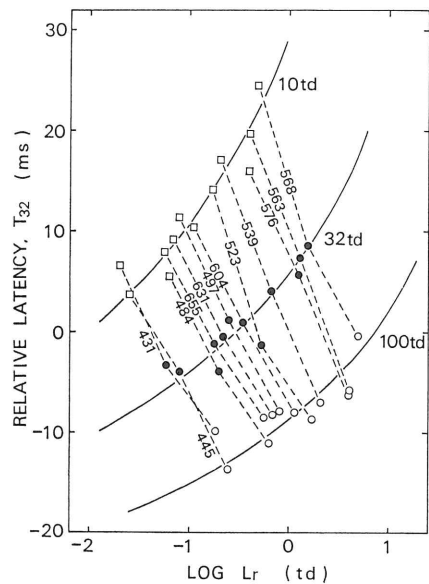


Fig. 8 Relation between the relative latency and the purity discrimination threshold. $\log L_r$ represents $\log L_o + \log \Delta p_c$, here L_o is retinal illuminance of the stimulus and Δp_c is the purity discrimination threshold¹⁴⁾.

Table 1 The values of the coefficients in the expression (3).

	p	$q(\times 10^{-2})$
10 td	3.01	1.6
32 td	2.03	2.3
100 td	1.15	2.8

ものである。純度弁別閾 $\Delta p_c(\lambda)$ の値としては、Priestら¹⁴⁾の結果から、本研究での波長に対する値を線形補間で求めて用いている。白丸は100 td, 黒丸は 32 td, 白四角は 10 td の場合を示している。Fig. 8 の点列は、それぞれの網膜照度において、一つの曲線にあてはめられるように思われる。潜時は、 $\log \Delta L(\lambda)$ が $\log L_0$ に近いほど長くなると考えられるから、このような性質を示す簡単な関数として指数関数を選び、点列を次のような指数関数で近似した。

$$\log L_r = -p10^{-qT_{32}} + \log L_0 \quad (3)$$

ここで、 $\log L_r$ は Fig. 8 の横軸で、波長 λ に対しては $\log \Delta L(\lambda)$ である。 L_0 は刺激光網膜照度、 T_{32} は相対潜時である。最小自乗法で求めた係数 p, q の値を Table 1 に示し、その曲線を Fig. 8 に実線で示している。網膜照度による係数、とくに q の値の違いは、網膜照度によって潜時の波長依存性の形が異なることに対応している。本研究では、Priestらの純度弁別閾の値をすべての網膜照度に対して適用した。しかし、彼らの結果は 80 td において求められたもので、もし、他の網膜照度で純度弁別閾の形が異なると、Fig. 8 の点列の配置も異なってくるであろう。たとえば、Guthら¹⁵⁾は彼らのモデルを用いて、反対色チャンネルの寄与率が変わると飽和度曲線の形が変わることを示している。網膜照度によって反対色チャンネルの寄与が異なり、その結果、純度弁別閾の波長依存性の形が変わるとすると、係数 p, q の値も Table 1 とは異なってくると思われる。しかし、本研究で用いた網膜照度での純度弁別閾の値がこれまで得られていないため、10 から 100 td の範囲での純度弁別閾を 80 td の値で代表させている。

ところで、これまでの考察においては、色相置換での刺激変化の検出には輝度チャンネルが関与しないとしてきた。これは色チャンネル応答を調べるための色相置換法の原理でもある。しかし、色相置換は必ずしも色チャンネルのみによって捉えられているとは限らないという批判がある。最後にこの点について検討する。

Mollon¹⁹⁾ は、輝度が一定で色相のみが変化するとき、そのとき、3種の錐体応答の比率が変化するため、

錐体の種類による応答時間特性の差によって、受容器レベルで刺激変化が検出されることも考えられるとした。これに対し、Bowen⁵⁾は、錐体応答と色相置換の知覚潜時との関係を検討した結果、受容器応答によっては色相置換の潜時を説明できないと結論した。ところで、色相置換法が用いられる場合、前もって、置換される刺激光の輝度設定がなされる。これには通常、交照法が用いられるが、錐体応答の時間特性の差は交照法の際にも関与していると考えられる。したがって、最小フリッカーを与えるように輝度設定された2刺激は、錐体応答の差をも含めて、輝度チャンネル応答の変動を最小あるいは閾以下に保って置換されると思われる。

以上の考察をまとめると次のようになる。色相置換の知覚潜時はある簡単な関係式によって純度弁別閾に対応づけることができる。また、この関係式で示される曲線の形は網膜照度によって異なっている。

5. む す び

色相置換法を用いて、色チャンネルにおける知覚潜時の波長依存性と、それに及ぼす網膜照度の影響を検討した結果、500 nm 以下および 600 nm 以上の波長範囲と、500 nm から 600 nm の中波長範囲とでは、波長依存性への網膜照度の影響が異なることがわかった。さらに、この知覚潜時の波長依存性は、純度弁別閾の波長依存性に簡単な関係式で対応づけられることがわかった。

最後に、本研究を遂行するにあたり、有益な助言をいただいた製品科学研究所人間工学部第3課の皆様、および筑波大学菊地正氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) L. M. Hurvich and D. Jameson: J. Opt. Soc. Am., **45** (1955) 602.
- 2) J. J. Voss and P. L. Walraven: Vision Res., **11** (1971) 799.
- 3) F. Weingarten: Science, **176** (1972) 692.
- 4) M. E. Breton: Vision Res., **17** (1977) 435.
- 5) R. W. Bowen: Vision Res., **21** (1981) 1457.
- 6) M. J. Nissen and J. Pokorny: Percept. Psychophys., **22** (1977) 457.
- 7) R. W. Bowen, D. T. Lindsey and V. C. Smith: J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 1501.
- 8) 新谷幹夫, 大頭 仁: 光学, **11** (1982) 607.
- 9) J. Pokorny, R. W. Bowen, D. T. Williams and V. C. Smith: J. Opt. Soc. Am., **69** (1979) 103.
- 10) T. J. Gast and S. A. Burns: J. Opt. Soc. Am., **69** (1979) 632.
- 11) S. L. Guth and H. R. Lodge: J. Opt. Soc. Am., **63** (1973) 450.
- 12) P. K. Kaiser and J. P. Comerford: Vision Res., **15** (1975) 1399.

- 13) D. Jameson and L. M. Hurvich: *J. Opt. Soc. Am.*, **45** (1955) 546.
- 14) I. G. Priest and F. G. Brickwedde: *J. Opt. Soc. Am.*, **28** (1938) 133.
- 15) W. D. Wright and F. H. G. Pitt: *Proc. Phys. Soc. London*, **49** (1938) 133.
- 16) A. Lit, R. H. Young and M. Shaffer: *Percept. Psychophys.*, **10** (1971) 397.
- 17) 池田光男: 色彩工学の基礎 (朝倉書店, 1980) p. 150.
- 18) S. L. Guth, R. W. Massof and T. Benzsawel: *J. Opt. Soc. Am.*, **70** (1980) 197.
- 19) J. D. Mollon: *Nature*, **283** (1980) 623.