

研究

知覚潜時と刺激純度

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)

Perceptual Latency and Excitation Purity

Yukio YAMASHITA

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

Perceptual latency of chromatic lights varying the dominant wavelength and the excitation purity was measured with hue substitution technique in 100 td. The data show that the latency of chromatic light increases with the decrease of the excitation purity for any dominant wavelength and has an approximately linear relation to the logarithm of retinal illuminance of the dominant wavelength light. It is found that the latency of a chromatic light shows a similar wavelength effect to that of the monochromatic light which equals in retinal illuminance to the dominant of the chromatic light, although there is a latency shift attributed to the difference in retinal illuminance level of those lights.

1. はじめに

視覚系における色チャンネルの応答時間特性が、色相置換法^{*1}を用いて調べられた結果、色相置換で色刺激が提示されたとき、色相の変化が検出されるまでの遅れ時間すなわち知覚潜時は、波長によって異なり^{1,2)}、さらに、その波長依存性は単色の飽和度関数 (chromatic saturation function) に似ていることが明らかになってきた^{3,4)}。飽和度関数は、単色光に対する色チャンネル応答の波長依存性を示しており^{5,6)}、したがって、これらの知見は、色相置換の潜時と色チャンネル応答の間に密接な関連があることを示唆するものである。しかし、これまで、このような関連についての定量的検討はほとんどなされていない。筆者は、前報告⁷⁾で、単色光の知覚潜時の波長依存性を調べ、さらに知覚潜時を、色相が置換された瞬間から色チャンネル応答が白色の色弁別閾レベルを越えるまでの時間と仮定することにより、潜時

と白色の純度弁別閾との関係を検討した。その結果、これらの間に簡単な対応関係があることを見いだした。白色の純度弁別閾は、飽和度関数に対応しており、得られた対応関係は、知覚潜時と飽和度関数を対応づけるものである。

ところで、色チャンネル応答の大きさを示すものとしては、飽和度のほかに色の純度がある。飽和度が、単色光に対する色チャンネル応答の大きさの違いを表わしているのに対し、純度は、同じ主波長についての色チャンネル応答の違いを示す。色相置換で提示された、主波長と輝度純度の異なる色光について、Gast⁸⁾は色の見えの提示時間閾 (duration threshold) を測定し、輝度純度と提示時間閾の間に逆の関係があることを示した。すなわち、置換された色光の輝度純度が高いと提示時間閾は短く、純度が低いと長くなった。この結果は、色チャンネル応答の大きさからみると、飽和度と潜時の関係と一致している。

いま、ある輝度の単色光と、それと同じ単色光に白色光が加わった色光 (以下、白色光以外を色光と呼ぶ) があるとき、これらの光刺激に対する視覚系の応答を比較すると、輝度チャンネル応答は異なるが、色チャンネルの応答に関してはほぼ等しくなっていると考えられる。

*1 色相置換法 (hue substitution technique) は光刺激の輝度を一定に保ったまま、色相のみを通常、白色から他の色へ変化させる刺激提示法で、この色相の変化は視覚系の色チャンネルのみを介して検出されると考えられるため、色チャンネルの応答特性を調べるための有力な手段となっている。

知覚潜時が色チャンネル応答の大きさに対応しているとすると、これら2種の色光に対する色相置換の知覚潜時は、互いに類似した波長依存性を示すであろう。そこで、本研究では、主波長と刺激純度とが異なる色光の、知覚潜時における波長依存性を調べ、さらに、前報告で示した単色光の知覚潜時と比較し、それらの間の関係について考察した。

2. 方法および実験装置

方法、実験装置は前報告⁷⁾とほとんど同じである。

Fig. 1 の刺激視野がマックスウェル視で被験者の右眼に提示され、被験者は視野中心の棒状固視点をみつめながら実験を行なった。全視野は前もって、被験者自身が白色等明さに設定した。次にテスト視野 A, B の白色光がある時間差 (stimulus onset asynchrony, SOA) で、輝度一定のまま、他の色に入れ換えられた。被験者は二つのテスト視野での色相変化の順序を判定し、三件法 (A が先, B が先, A と B が同時) で応答した。テスト視野の一方には標準波長 629 nm の単色光が提示され、もう一方に、テスト光が提示された。結果の集計の方法のみが前報告と異なる。前報告においては、同じテスト光に対するテスト視野 A, B での結果を合計し、そのうち、被験者ごとに相対潜時を求めた。一方、本研究では、先に、2名の被験者の結果をテスト視野ごとに合計した。これは、テスト視野 A, B に同じ刺激純度の色光を提示できなかったためである。相対潜時は、前報告と同様、集計結果のうち、各 SOA に対する同時判定の度数分布の算術平均値とした。

テスト光の主波長として、前報告で用いた 12 波長のうちの 8 波長 (干渉フィルタと色フィルタの組合せのピーク波長、455~655 nm の範囲) を用いた。網膜照度 100 td、テスト光の白色光成分の CIE xy 色度座標は、 $x=0.343$, $y=0.375$ であった。

被験者は色覚正常な男性 2 名 (KN, YY) である。被験者 YY (著者) は前報告の実験においても被験者として

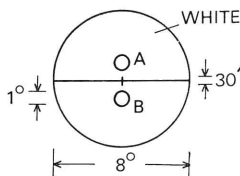


Fig. 1 Visual stimulus field. Fixation vertical line (30 min length) is provided at the center of 8 deg white field. A and B are two 1 deg test fields.

て参加した。

実験装置は、5 光路マックスウェル視光学系を用いた。テスト色光の置換は、遮光羽根に表面鏡 (0.3 mm 厚) を貼ったソレノイドシャッターを用いて行なった。シャッターのアーチャーに色光と白色光が、それぞれ光源側とその逆側から集光されており、シャッターが開いているときは直進光 (色光)、閉じているときは羽根の鏡による反射光 (白色光) が眼に提示された。このように、シャッターの開閉によってテスト視野の色が入れ換えられた。テスト光の刺激純度の設定は、前報告で示したように、偏光板を組み合わせることによって、単色と白色の混色光に含まれる、単色光と白色光の比率を調整して行なった。

3. 結果

網膜照度 100 td での標準波長 629 nm 単色光に対する相対潜時 T_{100} を、刺激純度 p_e に対して **Fig. 2** に示す。テスト光が提示された視野 A, B をそれぞれ、白丸と黒丸で示す。各主波長で、それぞれのテスト視野に提示された最も刺激純度の高い色光は、単色光として用いた色光である。各点の棒は、平均の標準誤差を示している。破線は、点列に沿って滑らかな曲線をあてはめたものであるが、どの主波長においても、刺激純度が低くなるに伴って、知覚潜時は長くなっており、また、この潜時の長くなる割合は、主波長によって異なっている。

ところで、前報告⁷⁾で、単色光の知覚潜時は、その網膜照度の対数との間に近似的な直線関係があることを示した。そこで、色光についても、潜時と主波長単色光成分の網膜照度 L_d との関係のみをみるため、**Fig. 2** の横軸を刺激純度から L_d の対数に変換して書き直したのが **Fig. 3** である*²。 **Fig. 2** と同様、テスト色光の提示視野を白丸と黒丸で示している。そして、実線は、単色光の場合と同様、最小自乗法を用いて点列にあてはめられた直線である。主波長によってはばらつきがみられるが、近似的にはよい一致を示していると思われる。この直線を、

$$T_{100} = -a_\lambda \log L_d + b_\lambda \quad (1)$$

と表わすと、係数 a_λ は、中波長範囲の主波長に対しては大きく、短波長や長波長範囲の主波長では小さい。こ

*² 主波長単色光成分の網膜照度 L_d は次のようにして求めた。 y_i, y_d をそれぞれ、テスト色光とその主波長の CIE xy 色度座標の y 座標値とすると、刺激純度 p_e と輝度純度 p_c の間には、 $p_e = (y_i/y_d) \cdot p_c$ の関係がある⁹⁾。また、テスト色光の網膜照度を L_0 とすると、 $L_d = p_c \cdot L_0$ である。これらの関係から、 L_d を求めることができる。

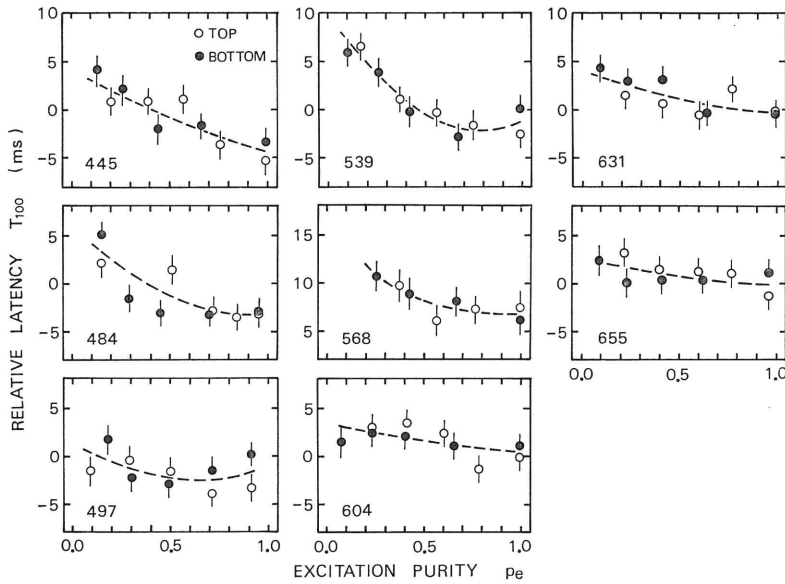


Fig. 2 Relative perceptual latency to standard wavelength light (629nm) as a function of excitation purity. T_{100} represents the relative latency to 100 td standard stimulus. The symbols show the test fields in which the test lights were presented: open circle: A; filled circle: B.

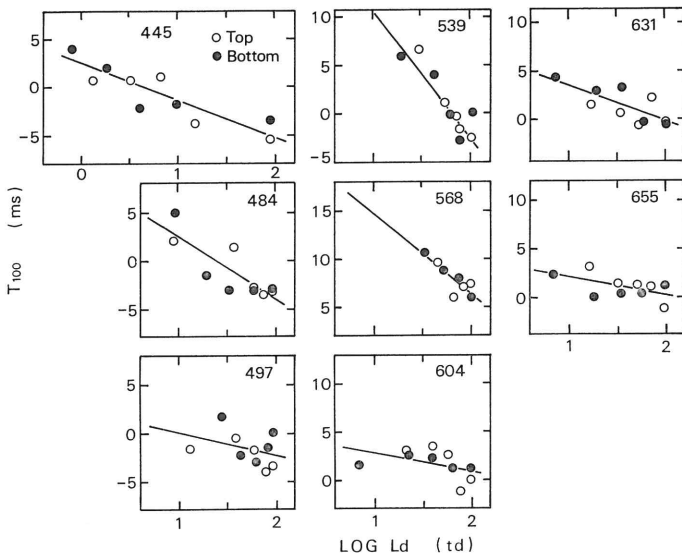


Fig. 3 Relative latency replotted as a function of the logarithm of retinal illuminance of the dominant wavelength light. Solid lines represent the linear relations between the latency and the log retinal illuminance of the dominant wavelength light.

13.8 ms/td だけ大きい, これらの波長依存性はよく似ている。

4. 考 察

単色光の相対潜時と、それと同じ網膜照度の主波長単色光成分を含む色光の相対潜時を比較する。まず、**Fig. 3** から、主波長網膜照度 L_d が 10, 32, 100 td の色光の潜時 T_{100} を求める。 L_d が 100 td については、それぞれの主波長で、上下のテスト視野に提示された最も L_d の大きい色光について、それらの潜時を平均する。 L_d が 10, 32 td については、近似直線から潜時を得る。次に、前報告では単色光の潜時が、32 td 標準波長光に対する相対潜時 T_{32} によって示されているため、得られた色光の潜時 T_{100} を、潜時 T_{32} と T_{100} の相対差が 7.7 ms であることを用いて、 T_{32} に書き換える。このようにして、それぞれの主波長網膜照度ごとに、知覚潜時 T_{32} を示

の係数を前報告で示した単色光についてと同様の係数と比較したのが **Fig. 4** である。色光と単色光の係数 a_λ をそれぞれ、 $a_{\lambda,c}$ および $a_{\lambda,m}$ と表わし、主波長 631 nm で両者を一致させて示している。 $a_{\lambda,m}$ は $a_{\lambda,c}$ に比べて、

したのが **Fig. 5** である。上段の図で、白丸が色光の相対潜時を示し、破線が単色光の潜時で、本研究に用いた 8 波長に対する潜時のみを示している。下段の図は、単色光の潜時 ($T_{32,m}$) と色光の潜時 ($T_{32,c}$) の差を示して

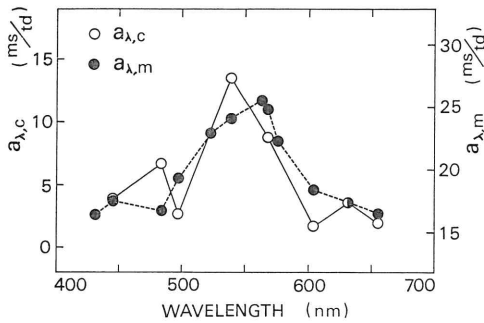


Fig. 4 The values of α_λ in the expression (1). $\alpha_{\lambda,c}$: chromatic light; $\alpha_{\lambda,m}$: monochromatic light. $\alpha_{\lambda,m}$ is shifted by 13.8 for $\alpha_{\lambda,c}$.

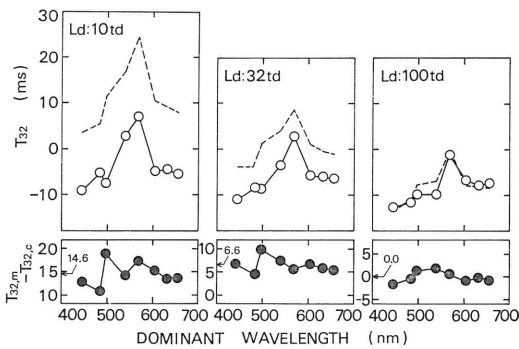


Fig. 5 Wavelength effect of chromatic light latency $T_{100,c}$ (top) and the difference in latency from monochromatic light latency $T_{100,m}$ (bottom). In top figures, open circles represent the latency of the chromatic lights and broken lines show that of monochromatic lights. In bottom figures, filled circles represent the difference in latency, $T_{100,m} - T_{100,c}$ and arrow signs show the averaged values of the difference.

おり、8波長の潜時差の平均を縦軸に矢印で示す。L_dが100tdの場合は、同じ単色光の結果であるから、潜時はほとんど一致し、潜時差の平均も0.0msとなっている。なお、本研究と前報においては、被験者一名が重複しているため、L_dが100tdのときの潜時の差はおもに、重複していない被験者の結果の相違によるものである。L_dが10, 32tdの場合、その波長依存性は単色光の場合と相似している。ただし、T_{32,c}とT_{32,m}の間には、8波長の平均で、それぞれのL_dにおいて14.6msおよび6.6msの潜時のシフトがある。潜時の波長依存性が相似していることは、これら2種の色光に対する色チャンネル応答の相似性を示していると思われる。一

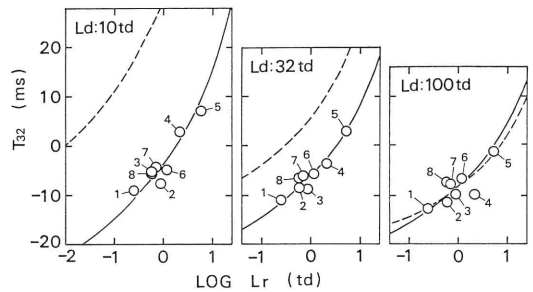


Fig. 6 LP curves of chromatic lights. The ordinate is the latency T_{32} and the abscissa is $\log L_r$ representing $\log \Delta L(\lambda)$. Here $\Delta L(\lambda) = \Delta p_c(\lambda) \cdot L_0$; $\Delta p_c(\lambda)$: purity discrimination threshold; L_0 : retinal illuminance of chromatic light. Solid lines are the LP curves of chromatic lights and broken lines are those of monochromatic lights. The numeral of the point represents the dominant wavelength of test light. See text for explanation.

方、色光と単色光との間の潜時のシフトは、網膜照度の違いのためと考えられ、これは、Fig. 4に示した単色光と色光の係数 α_λ の差、13.8ms/tdに対応している。

以上のように、単色光と色光の潜時を比較し、それらの間の関係を示した。ここで、このような潜時の関係を、前報告で示した、知覚潜時と純度弁別閾を対応づける曲線(以下、LP曲線: latency-purity discrimination threshold curveと呼ぶ)によって表わしてみよう。知覚潜時を、色チャンネル応答が白色の純度弁別閾レベルを越えるのに要する時間と考え、知覚潜時を純度弁別閾に対応づけて得られたのがLP曲線であり、次の式で表わされる。

$$\log L_r = -p10^{-qT_{32}} + \log L_0 \quad (2)$$

ここで、 L_r は検出閾値^{*3}を表わし、 L_0 は色光の網膜照度、 T_{32} は知覚潜時である。 p, q は単色光の網膜照度によって異なる値をとる係数である。Fig. 6に色光に対するLP曲線を示す。Fig. 6の各点は、Fig. 5上段の図の白丸の点を、各波長の検出閾値の対数と潜時の関係にプロットし直したものである。各点の数字は波長を示し、数字1を445nmとして、順次、大きな数字が長い

^{*3} 純度弁別閾 $\Delta p_c(\lambda)$ は、弁別閾において色光に含まれる単色光成分の輝度を $\Delta L(\lambda)$ 、色光の輝度を L_0 とすると、その比、 $\Delta L(\lambda)/L_0$ と定義される⁹⁾。 $\Delta L(\lambda)$ は純度弁別閾の色チャンネル応答の大きさに対応する物理量であり、また、色チャンネル応答がこのレベルを越えたときに色相の変化が検出されると仮定していることから、これを検出閾値と呼ぶことにする。なお、本研究でも、前報告と同様、純度弁別閾 $\Delta p_c(\lambda)$ の値は、Priestら¹⁰⁾の結果から、本研究で用いた波長に対する値を線形補間で求め、用いている。

Table 1 The values of the coefficients, p and q , in the expression (2).

	p		$q (\times 10^{-2})$	
	Colored light	Spectral light	Colored light	Spectral light
10td	1.76	3.01	1.6	1.6
32td	1.49	2.03	2.1	2.3
100td	1.26	1.15	2.4	2.8

波長を示している。色光の場合、網膜照度が一定であれば、検出閾値は主波長網膜照度によらず一定と考えられるから、どの L_a に対しても、検出閾値は同じ値をとっている。Fig. 6 の実線が点列にあてはめられた LP 曲線であり、破線は単色光の LP 曲線である。LP 曲線を表わす式(2)の係数 p, q の値を、単色光の場合とともに Table 1 に示す。潜時の波長依存性が相似であることから予想されるように、LP 曲線の形を決定している係数 q の値は、色光と単色光ではほぼ等しい。一方、係数 p の値は、 L_a が 10, 32td において異なっており、これは、色光と単色光の間の潜時のシフトのためである。

Fig. 6 における色光と単色光の LP 曲線の位置関係が、それらの潜時の関係を示している。すなわち、色光の網膜照度が変わると、検出閾値が変わるが、このとき、潜時も一定の割合で変化することを Fig. 6 は示している。網膜照度の変化に対する潜時の変化の割合を示すのが Fig. 4 における $a_{\lambda,c}$ と $a_{\lambda,m}$ の差、13.8ms/td であり、Fig. 6 において、 -13.8ms/td の傾きをもった直線に相当する。すなわち、 L_a が 10, 32td の色光の LP 曲線を、傾き -13.8ms/td の直線に沿って平行移動すると、それぞれ、網膜照度 10, 32td の単色光の LP 曲線に重なる。この LP 曲線の平行移動が、色チャンネル応答への網膜照度レベルの影響を示している。

以上のように、色光の知覚潜時は、それに含まれる主波長単色光成分のみの知覚潜時と、波長依存性が相似している。しかし、これらの間には、波長にほとんど依存しない潜時のシフトがあり、これは、2 種の色光の網膜照度が異なるためと考えられる。このような色光と単色光の潜時の関係は、LP 曲線を用いて表わすと、位置関係として表わされることが示された。すなわち、LP 曲線の形は色光に含まれる単色光成分の網膜照度によって

決定されていること、そして、LP 曲線を刺激光の網膜照度に応じて、一定の傾きの直線に沿って平行移動させることによって、色光の知覚潜時を表わすことができることを示した。

5. む す び

色相置換法を用いて、主波長および刺激純度の異なる色光の知覚潜時を求めた。その結果、色光の知覚潜時はどの主波長においても、刺激純度が低くなると長くなることがわかった。さらに、色光の知覚潜時と単色光の場合とを比較すると、ある網膜照度の単色光と、それと同じ単色光に白色光を加えた色光とでは、知覚潜時の波長依存性が相似していることが示された。しかし、それらの知覚潜時の間には、潜時のシフトがあり、これは網膜照度レベルが異なるためと考えられる。このような色光と単色光の潜時の関係は、知覚潜時を白色の純度弁別閾に対応づける LP 曲線を用いると、LP 曲線の位置関係として表わされることを示した。

色相置換の知覚潜時は、色チャンネル応答を推測するための有力な指標であるが、色チャンネルの応答特性を明らかにするためには、さらに、種々の光刺激条件での知覚潜時と色チャンネル応答との関係が明らかにされてゆかなければならない。

最後に、本研究を行なうにあたり、有益な討論、助言をいただいた製品科学研究所人間工学部 3 課の皆様、筑波大学菊地正氏に深く感謝します。

文 献

- 1) F. Weingarten: Science, **176** (1972) 692.
- 2) M. E. Breton: Vision Res., **17** (1977) 435.
- 3) M. J. Nissen and J. Pokorny: Percept. Psychophys., **22** (1977) 457.
- 4) R. W. Bowen: Vision Res., **21** (1981) 1457.
- 5) D. Jameson and L. M. Hurvich: J. Opt. Soc. Am., **45** (1955) 546.
- 6) P. K. Kaiser and J. P. Comerford: Vision Res., **15** (1975) 1399.
- 7) 山下由己男: 光学, **13** (1984) 308.
- 8) T. J. Gast and S. A. Burns: J. Opt. Soc. Am., **69** (1979) 632.
- 9) 池田光男: 色彩工学の基礎 (朝倉書店, 1980) p. 87.
- 10) I. G. Priest and F. G. Brickwedde: J. Opt. Soc. Am., **28** (1938) 133.