

継時比較による色弁別

内川 恵二

光学 第11卷第6号（1982年12月）別刷

研究

継時比較による色弁別

内川恵二*

東京工業大学総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田4259
(1982年4月16日受理)

Color Discrimination with Successive Comparison Method

Keiji UCHIKAWA*

Department of Psychology, York University
4700 Keele St., Downsview, Ontario M3J 1P3, Canada

Several experimental results on successive color discrimination are reviewed to investigate human memory for color. It is shown that the successive color discrimination threshold reaches to an asymptote of a certain discrimination threshold level with a relatively short temporal delay between presentations of two colors. This discrimination threshold level is shown to be almost constant even as the temporal delay increases further, and about twice greater than the simultaneous discrimination threshold in both wavelength and purity discriminations. Some important implications are discussed about temporal characteristics and degree of the color discrimination deterioration.

1. はじめに

人間の視覚系による色弁別に関する研究は、Wright や MacAdam の研究以来、様々な観測条件のもとで数多く行なわれてきた。¹⁾たとえば、網膜周辺や小視野での波長弁別、輝度レベルを変化させた場合の色弁別などが調べられ、視覚系の色弁別能が観測条件に大きく依存していることが示されている。それらの研究は色覚のメカニズムを探る上で重要であり、さらに応用面における基礎的なデータを提供している。

色弁別の実験では弁別のしやすさという点から Fig. 1 (a) のように 2 色 C_1 , C_2 を視覚 2° 以下の小さな視野内に隣接併置して刺激視野を作り、2 色が同時に比較できる条件を用いている。ところが我々の日常生活においては、多くの場合比較したい 2 色を隣接併置することができない。そこで我々は通常 Fig. 1 (b) に示すように、初めて一つの色 C_1 を見て、ある時間 t 経過した後に比較する色 C_2 を見て 2 色を比べ、同じあるいは違うと判断を下

しているわけである。このような時間遅れを伴なっての 2 色の比較、つまり色の継時比較が実際には多く行なわれている。時間遅れ t の値は実際の状況によって極めて短い 1 sec 以下という場合から 1 日以上というような長時間にわたる場合まで様々に考えられるが、いずれにしても色の継時比較をするためには最初に見た色を記憶しておく必要があり、色の継時比較は色の記憶比較ということもできるであろう。

視覚系の色弁別能力はそもそも大変優れており、2 色を隣接併置した場合には極く僅かな色差（波長弁別でいえば 1 から 5 nm の差）を弁別することができる。¹⁾したがってたとえば自動車のボディーの一部を塗り替える場合などは、車体の元の色と新しく塗る色は隣接するので 2 色を正確に一致させなければ容易に色の差がわかつてしまう。では 2 台の自動車の色を比較する場合はどうであろうか。この場合は 2 色を隣接併置比較できないので我々は継時比較を行なうことになる。また、カラー写真などを見る時、“あの時の空の色はもっと青かった。”

(a)



(b)

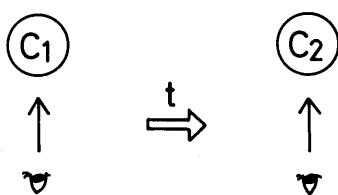


Fig. 1 (a): Simultaneous viewed, juxtaposed color comparison.

(b): Successive color comparison. t ; temporal delay between glances of two colors C_1 , C_2 .

というように写真の色と撮影時の実際の色との違いに気付くことも日常よく経験する。これは記憶した色とカラーフィルムの色とを比べているわけで、Fig. 1(b) の t が長い場合の縦時比較に相当する。

それでは我々はどのくらいの正確さで縦時比較による2色の弁別ができるのであろうか。色の縦時比較あるいは色の記憶に関する研究は、これまで研究の数が少なく定量的な研究は最近になってようやく始められたところである。色の記憶に関する研究は大きく三つに分類できる。第一に記憶色 (memory color) あるいは概念色 (concept color) についての研究²⁾で、これは物の形や概念と関連した色、たとえばバナナの黄色、リンゴの赤色、芝生の緑色といった色を対象とするものである。第二は部分報告法 (partial report technique) による短期記憶 (short-term memory) の研究の中で色を用いたものである。これは、呈示したいいくつかの刺激の中から被験者に答えさせる刺激を指示するために、刺激の位置や形といったものの代わりに、刺激の色を使った研究^{3), 4)}である。第三が純粹に色だけの記憶を扱い、2色を縦時比較して色弁別、見えの色の変化を測定した研究⁵⁻⁸⁾である。以上の3種類の中では、第三の研究が前述した色の縦時弁別能に関する疑問に対して最も基礎的なデータを与えるものと考えら

れる。そこで本論文ではこれら色の縦時比較の研究を著者の行なった実験を中心にまとめ、結果の持つ意味を新たに考察する。

2. 縦時色弁別の時間特性

Newhall⁵⁾は色の記憶について調べるために、色比較視野にテスト色とマッチング色それぞれの呈示を縦時的に行なって、被験者に等色を行なわせた。まず、テスト色を 5 sec 呈示し、次に 5 sec の時間間隔 ISI (inter stimulus interval)* 後、マッチング色を連続呈示する。テスト色には、マンセル・ヒュー、バリュー、クロマの異なる 25 個のマンセル色票を用いている。結果として、縦時等色ではマッチング色のばらつきが同時等色の場合に比べて増大することを示した。縦時等色では、等色が完了するまでに約 20 sec 以上かかった。したがって、約 20 sec 以上の時間遅れがあると、色弁別能は縦時比較により劣化することが示唆される。また、Hamwi と Landis⁹⁾は縦時等色による色弁別能の劣化は 2 色の呈示の時間遅れが 15 min から 65 hr まで変化してもある量以上は進まないと報告している。したがって 2 色を縦時比較する場合、時間遅れが比較的長い約 20 sec 以上という値ではすでに視覚系の色弁別能は劣化してしまっているといえる。

Uchikawa と Ikeda⁶⁾は波長弁別閾値 ($\Delta \lambda$) を特に短い呈示時間遅れをもつ 2 色の縦時比較により測定し、色弁別能の劣化の時間特性について明らかにした。実験は視角 2° の 2 分視野にテスト波長 (λ_t)、比較波長 (λ_c) を縦時的に呈示するもので、 $\Delta \lambda$ の決定には恒常法を用いている。Fig. 2 に λ_t , λ_c 共に呈示持続時間 D を 110 msec とし、呈示開始時刻遅れ SOA (stimulus onset asynchrony)* を 0 から 5.5 sec まで変化させた場合の結果を示す。被験者は 2 名で $\Delta \lambda$ が SOA の関数としてプロットしてある。テスト波長はそれぞれの図中左上に示した。黒丸は SOA を 0 から 5.5 sec まで変化させて測定した結果で、白丸は SOA をさらに細かく 0 から 220 msec までの短い時間範囲で変化させた場合の結果である。実線、破線は黒丸、白丸それぞれの測定点に最適にフィットするようにして求めた近似関数である。Fig. 2 では

* ISI は第一の刺激の呈示終了時刻と第二の刺激の呈示開始時刻の時間間隔で定義される。たとえば、ISI = 0 ならば 2 刺激は続けて呈示されることになる。

** SOA は 2 刺激の呈示開始時刻の時間間隔で定義される。したがって、たとえば SOA = 0 ならば 2 刺激は同時に呈示となる。

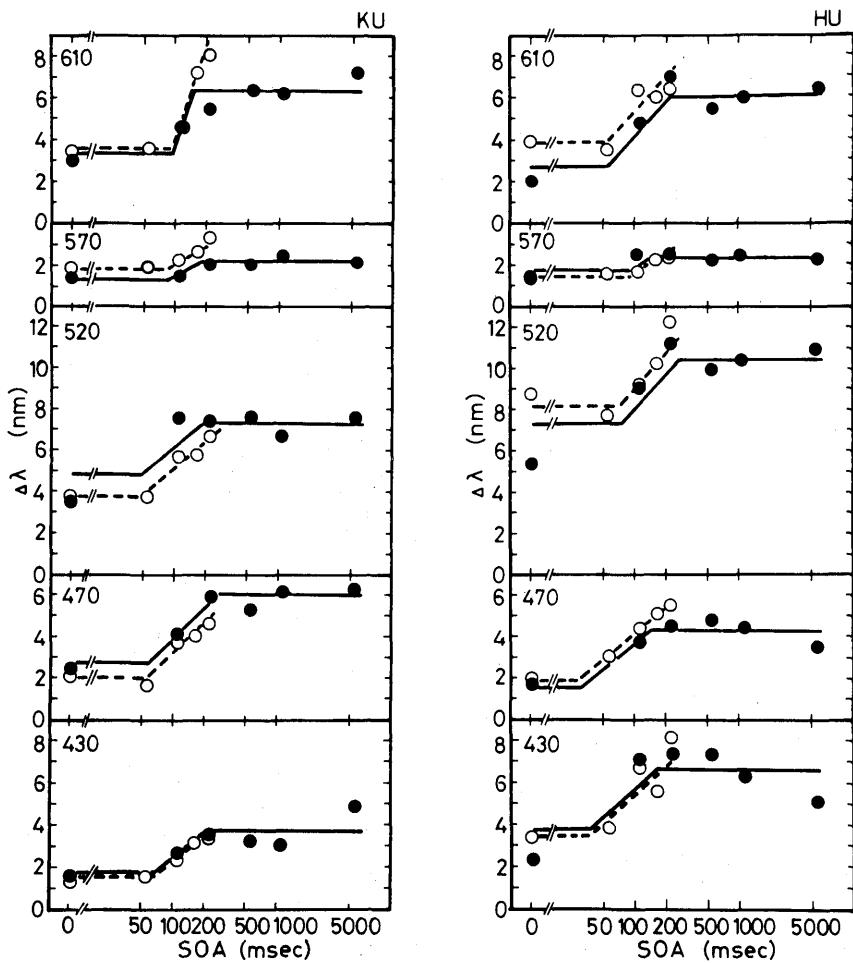


Fig. 2 Wavelength discrimination thresholds ($\Delta\lambda$) as a function of SOA. Duration: 110 msec. Test wavelengths are shown in nm in the upper left of each section. Subjects: KU (left), HU (right). SOA varies from 0 to 5.5 sec (●) and 0 to 220 msec (○). Solid and dotted lines are empirical functions best fitted to each set of points.

両被験者共にすべてのテスト波長で $\Delta\lambda$ は SOA が約 50 msec までは一定、その後増大し、約 200 msec を越えると再び一定値をとるという時間特性を示している。これより継時比較による波長弁別能の劣化は 2 色の呈示の時間遅れが極めて短い範囲で起こり、さらにそれ以後、弁別能の劣化はほとんど進まず一定になることがわかる。

次に Fig. 3 に呈示持続時間 D をパラメータとして 55 (黒三角)、110 (黒丸, 白丸)、220 (黒四角)msec と変化させ、 $\Delta\lambda$ を測定した結果を示す。テスト波長は図中左上に示した。 $D = 110$ msec の結果は Fig. 2 より再プロットしたものである。 D を 55 msec より 220 msec に増大すると $\Delta\lambda$ の値は全体的に減少する。しかし D の値にかかわらず SOA に対する $\Delta\lambda$ の変化はほぼ同じ時間

特性を示している。したがって波長弁別能が劣化をはじめる SOA が約 50 msec という値、また一定劣化レベルに達する SOA が約 200 msec という値は、2 刺激の呈示持続時間が 220 msec 以下という短い場合には、呈示持続時間に依存しない量といえよう。

Nilsson と Nelson⁷⁾ は継時等色法を用いて、Fig. 2 で示した結果よりもゆるやかに劣化する波長弁別能の時間特性を報告している。彼らの実験では刺激の呈示持続時間を 1 sec とし、最小の SOA が 1.1 sec であるため、Fig. 2 および Fig. 3 のような SOA の特に短い範囲での波長弁別能の変化は求められていない。しかし、SOA が 5 から 10 sec 以下で、波長弁別能の劣化が止まり、それ以後はほぼ一定になることが示されており、この点は

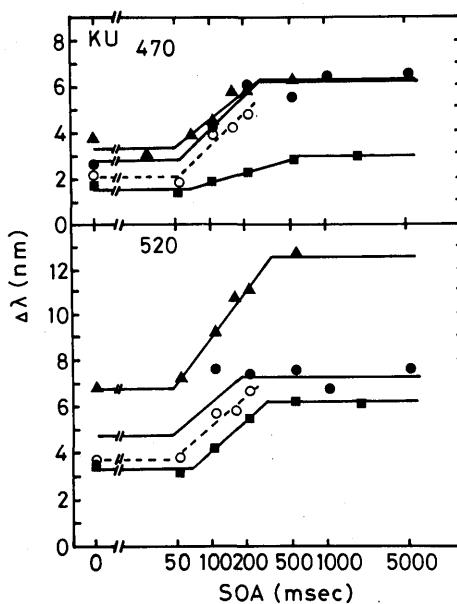


Fig. 3 Same as Fig. 2, but duration: 55 msec (▲), 110 msec (●, ○) and 220 msec (■). Subject: KU.

UchikawaとIkeda⁶⁾の結果と同じ傾向といえるであろう。

3. 記憶による色弁別能の劣化程度

前節では継時比較による色弁別閾値は、2色の呈示の時間遅れを増加させるとある劣化レベルに達し、その後は増大しないことが示された。そこでここではこの劣化レベルに達した色弁別閾値を記憶による色弁別閾値として、同時比較による色弁別閾値と定量的に比較する。

UchikawaとIkeda⁶⁾はテスト波長を430から650 nmまで10 nmおきにとり継時比較による波長弁別閾数を求め、同時比較の波長弁別閾数との比較を行なった。結果をFig.4に示す。刺激の呈示持続時間は110 msec、SO Aとしては0 msec(同時比較)および550 msec(継時比較)を用いている。被験者は3名採用している。図中同時比較の波長弁別閾数(黒丸)は過去に同様な条件で測定された波長弁別閾数と形状および $\Delta\lambda$ の値の大きさ、いずれもよく一致している。¹⁾一方、継時比較の波長弁別閾数(白丸)は、ほぼすべての被験者で $\Delta\lambda$ の値が同時比較の場合と比べて増大し、波長弁別能の劣化を示している。 $\Delta\lambda$ の値の増大の程度は450 nm, 500 nm付近で大きく、570 nm付近で小さい。また、継時比較による波長弁別閾数のピークがやや短波長側に移行している傾向がみられる。継時比較による $\Delta\lambda$ の値は、同時比較

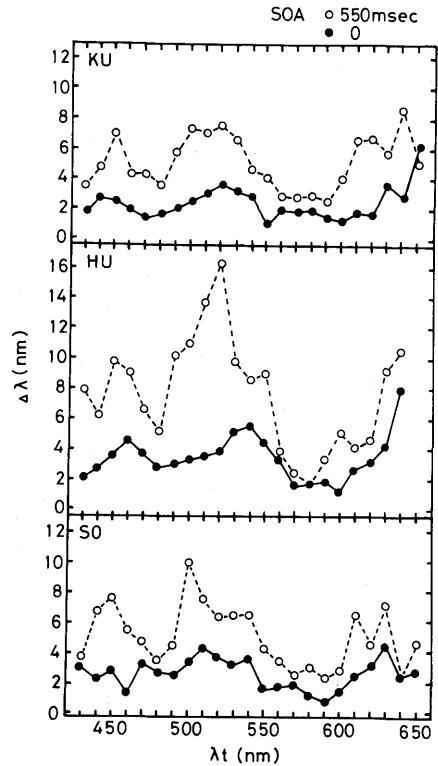


Fig. 4 Wavelength discrimination functions measured with simultaneous comparison (●, SOA=0 msec) and successive comparison (○, SOA=550 msec) for three subjects. Duration: 110 msec.

の $\Delta\lambda$ の値と比べすべての波長で平均すると、KU 2.3倍、HU 2.3倍、SO 2.0倍となる。このような継時比較による波長弁別閾数の特徴は、NilssonとNelson⁷⁾による継時等色法によっても示されている。

波長弁別は知覚的には単色光の色相の弁別にほぼ対応するが、次に色光の彩度の弁別に対応する純度弁別についての実験結果を示す。Uchikawa⁸⁾は二つの視角45'の円形視野を30'の間隔で併置して、それぞれテスト刺激、比較刺激として用い、色光の純度弁別を行なった。テスト刺激としては410 nmから650 nmまでの波長から七つの主波長を選び、各主波長で五つのテスト純度を決め、計35個の色度の異なる色光を用いている。刺激の呈示持続時間は1 sec、SOAは0 sec(同時比較)と3 sec(同時比較)である。同時比較の純度弁別閾値($\Delta\rho$)をFig.5(a)に示す。 $\Delta\rho$ はCIE 1931色度図上に、各テスト刺激の位置(黒丸)の両側に線分で示されている。線分の全長は $\Delta\rho$ の値の2倍になっている。また見やすくするために、いくつかの刺激の位置は多少横方向にずら

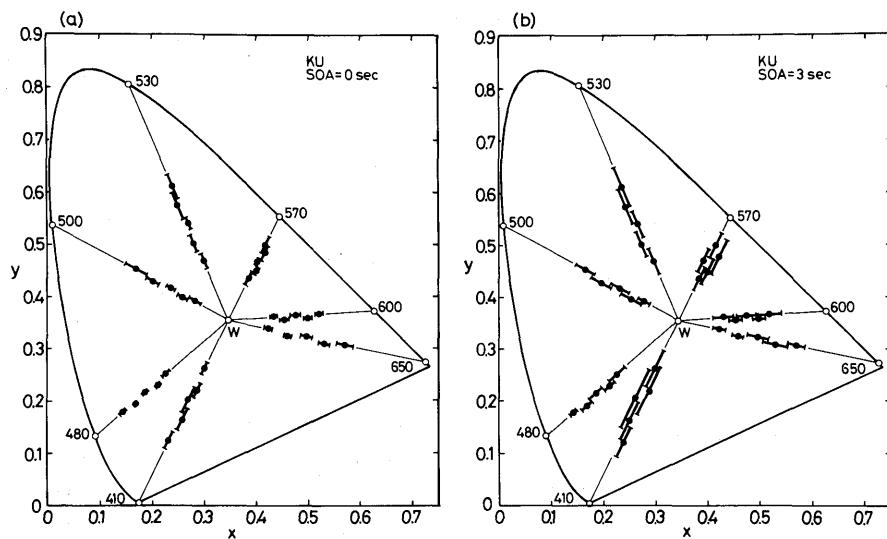


Fig. 5 Purity discrimination thresholds shown by dashes on test purity positions. (a): Simultaneous comparison (SOA=0 sec). (b): Successive comparison (SOA=3 sec). Duration: 1 sec. Some test purity positions are shifted laterally for clarity.

して表示した。Fig. 5(b) には継時比較による純度弁別閾値 ($\Delta p'$) を同様に示した。Fig. 5(a) と (b) を比較すると $\Delta p'$ は Δp よりすべてのテスト刺激で明らかに増大し、純度弁別においても継時比較の場合の方が弁別能が劣化していることがわかる。

継時比較による純度弁別閾値の増大の程度は、同じ主波長をもつ刺激の間では純度の差により特に系統的に違はないが、刺激の主波長が異なると違いがみられる。そこで、この違いをより明確に表わすために、 $\Delta p'$ と Δp の比 ($\Delta p'/\Delta p$) をとり各主波長別に示したのがFig. 6

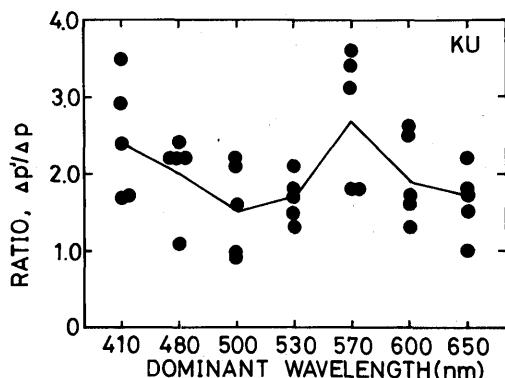


Fig. 6 Ratio of successive purity discrimination threshold ($\Delta p'$) to simultaneous purity discrimination threshold (Δp) as a function of dominant wavelength of test stimuli. Solid line represents mean value of five points for each dominant wavelength. Subject: KU.

である。図中、同一主波長上の各点は純度の異なるテスト刺激に対応し、実線は平均値を表わす。Fig. 6をみると、主波長 410 nm と 570 nm で純度弁別能の劣化が大きく、比の値は約 2.5 となり、また主波長 500 nm で最も劣化が少なく、比の値は約 1.5 となっている。すべてのテスト刺激での比の値を平均すると 2.0 となり、波長弁別の場合に示した劣化の程度とはほぼ等しくなっている。

刺激の色相と彩度を同時に変化させながら色弁別閾値を測定した実験には、前述した Newhall ら⁵⁾の実験がある。彼らの示した継時等色によるマッチング色のばらつきは、同時等色の場合に比べて、CIE1931 色度図上で、一次元方向では約 2.5 倍増大している。また、25 個のテスト色が占める色度図上の領域は白色を中心としたあまり広くない領域であるが、この領域内ではテスト色の位置の違いによるばらつきの増大に大きな差は見られない。そこで以上の結果をまとめると、波長弁別、純度弁別、さらに一般的な色弁別において、記憶による色弁別能は同時比較の場合に比べて、弁別閾値で約 2.0 から 2.5 倍に劣化するといえよう。

4. 考 察

4. 1 継時色弁別の時間特性について

Fig. 2 および Fig. 3 の例で示したように、2 刺激の呈示持続時間が短い場合には、波長弁別閾値 ($\Delta \lambda$) は

2刺激の呈示のSOAがかなり短い間に増大し、その後は一定値をとる。ここではFig.2およびFig.3で示した時間特性と2刺激の呈示の時間条件の関係について考察する。Fig.7上部には $\Delta\lambda$ と△λの関係を模式的に示す。

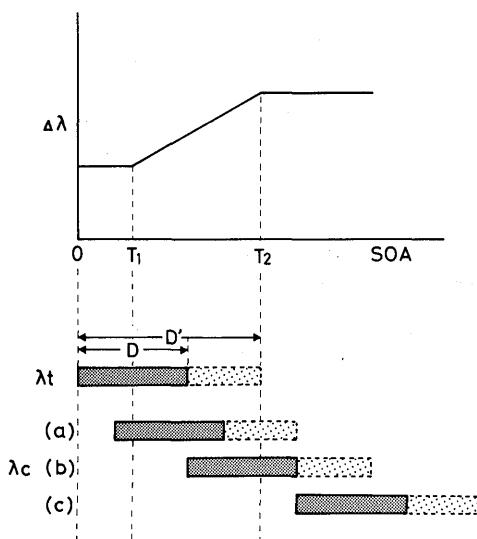


Fig. 7 Above: A schematic $\Delta\lambda$ -SOA function. T_1 , T_2 represent SOAs when $\Delta\lambda$ starts to increase and reaches to an asymptote. Below: Temporal conditions for presentations of test wavelength (λ_t) and comparison wavelength (λ_c). D indicates duration of λ_t and λ_c , and D' visual persistence of λ_t and λ_c . (a), (b) and (c) show different temporal conditions for presentations of λ_t and λ_c .

した。 T_1 は△λが増大をはじめるSOAの値、 T_2 は△λが一定値に達する時のSOAの値である。また下部には2刺激の呈示の時間条件を示した。 λ_t はテスト波長、 λ_c は比較波長を表わす。最初に呈示される λ_t に対して、 λ_c の呈示を、(a) $SOA < T_1$ 、(b) $T_1 < SOA < T_2$ 、(c) $SOA > T_2$ と三つの場合にわけて示してある。図のDは刺激の物理的な呈示持続時間で、 D' は後述する刺激の見えの持続時間を示している。

まず(a)の状態では物理的にSOAを入れて λ_c の呈示開始を遅らせても波長弁別は同時呈示の場合とかわらない。 T_1 の値はFig.2およびFig.3の実験結果から約50 msecと示され、視覚系が2刺激を分解できる最小の時間幅として閾値法などにより求められた60から100 msec¹⁰⁾に近い値である。そこでSOA<50 msecの場合には2刺激を物理的に緒時呈示しても視覚的には2刺激がほとんど同時に見え、そのためこのSOAの範囲では波長弁別閾値が変化しないと考えられる。

次に(b)の状態についても2刺激の物理的な呈示時間条件と視覚系での見えの関係から考えてみる。刺激の呈示持続時間が200から300 msec以下の場合、刺激は見えの持続^{*}(visual persistence)の効果があり、物理的な呈示持続時間のいかんにかかわらず200から300 msec間、視覚的には持続して見えているという多くの実験結果が報告されている。^{10, 11)} T_2 の値はFig.3の実験結果からDを55, 110, 220 msecと変化させても約200 msec一定であった。そこでFig.7で示したように視覚的な見えの持続時間 D' が $T_2 (= 200 \text{ msec})$ と等しいとすると、以下のように実験結果を考えることができる。 λ_t が物理的な呈示持続時間にかかわらず200 msec間見えているため、SOAを50から200 msecまで増加しても λ_c は λ_t と視覚系の中で見えの時間的な重なりがある。しかし、この見えの時間的な重なりはSOAの増大に伴なって徐々に減少していく。すなわち、完全な同時比較から部分的な同時比較へと移行する。その結果、弁別閾値が増大していくと考えることができる。

最後に(c)で示した状態になると2刺激は視覚的にも見えの時間的な重なりがなく完全に緒時呈示されることになる。この状態ではFig.3, 4の実験結果から、2刺激のSOAが増大しても弁別閾値に変化がないことが示されている。すなわち λ_t をいったん記憶し、 λ_c との弁別を行なう場合には、弁別能はSOAの大きさにほとんど影響されないと見える。

刺激の見えの持続は視覚情報の一種の短期記憶でもあり、その発生過程は視覚系のかなり末端レベルであるとされている。¹¹⁾ 最適な色弁別には上述したように2色が同時に見えることが重要な条件であることから、この末端レベルでの色の差の情報が色弁別にかなり大きく寄与しているのではないだろうか。またこの末端レベルでの色弁別は2色の呈示の時間遅れがある値以上になると次第に劣化していくと考えられる。一方、2色の呈示の時間遅れが刺激の見えの持続時間以上になり、完全な緒時比較によって色弁別が行なわれる場合には記憶が必ず関与することから、その結果には色覚系の中核レベルでの機能が反映していると考えられる。この中核レベルでの色弁別は時間が経過しても劣化が弁別閾値にして同時比較の約2倍以上は進まないことから、視覚系には色情報をある程度の正確さで長時間保持できる機能が備わって

* 刺激の呈示終了後も視覚的には刺激がある時間だけそのまま持続して見える現象をいう。

いるといえよう。視覚系にこのような同時比較による処理と継時比較による処理という二つの質の異なった処理過程が存在するという考えは色弁別に限らず、パターンの知覚に関するものも示されており^{12, 13} 同時と継時の二つの処理過程は視覚系の一般的な性質といえよう。

4.2 記憶による色弁別閾値の大きさについて

第3節では記憶による色弁別閾値は同時比較の場合に比べて一般的に約2倍増大することを示したが、ここでは弁別閾値の変化を色覚のメカニズムから検討してみる。Fig.4に示した3被験者の波長弁別閾値の平均値を求めFig.8に示した。黒丸は同時比較の場合、白丸は継時比

の混同色線(confusion loci)上にあり、主波長500 nm テスト刺激は第二色覚異常者(deutanope)の混同色線上にある。¹⁴⁾ すなわち前者の純度弁別は $y - b$ システムにより、後者の純度弁別は $r - g$ システムによると考えることができる。¹⁵⁾ したがって Fig.6 の結果からも弁別の劣化は $y - b$ システムの方が $r - g$ システムよりも大きい傾向にあるといえよう。前述したように、同時比較による色弁別が視覚系の末端レベル、継時比較による色弁別が中枢レベルで行なわれると考えると、中枢レベルにおいては $y - b$ システムが $r - g$ システムに比べて相対的に色弁別の感度が低いということになる。

5. 結 び

本論文では継時比較による色弁別の実験結果をまとめその意味を新たに考察した。2色を継時比較する場合には、2色の呈示の時間遅れがかなり短い範囲で色弁別能は劣化してしまい、それ以上時間遅れを増加してもあるレベル以上は劣化は進まないことが示された。また、この劣化レベルを記憶による色弁別能とすると、同時に2色を併置比較する場合よりも、記憶による色弁別能は弁別閾値にして約2倍増大することが示された。さらに、色弁別能の劣化の時間特性と劣化の大きさを視覚系のメカニズムの上で考察した。

最後に本論文をまとめる際に有益な助言を与えて下さった York 大学の P. K. Kaiser 教授に感謝致します。

文 献

- 1) R. M. Boynton: *Human Color Vision* (Holt, New York, 1979).
- 2) C. J. Bartleson: *J. Opt. Soc. Am.*, **50** (1960) 73.
- 3) W. P. Banks and G. Barber: *Psychol. Rev.*, **84** (1977) 536.
- 4) S. E. Clark: *J. exp. Psychol.*, **82** (1969) 263.
- 5) S. M. Newhall, R. W. Burnham and J. R. Clark: *J. Opt. Soc. Am.*, **47** (1957) 43.
- 6) K. Uchikawa & M. Ikeda: *Vision Res.*, **21** (1981) 591.
- 7) T. H. Nilsson and T. M. Nelson: *J. exp. Psychol. Human Percept. Perform.*, **7** (1981) 141.
- 8) K. Uchikawa: *Vision Res.* (in press).
- 9) V. Hamwi and C. Landis: *J. Psychol.*, **39** (1955) 183.
- 10) L. Ganz: *Temporal Factors in Visual Perception* (*Handbook of Perception* Vol. 5, Academic Press, New York, 1975) p. 169.
- 11) M. Coltheart: *Percept. Psychophys.*, **27** (1980) 183.
- 12) M. Ikeda and K. Uchikawa: *Vision Res.*, **18** (1978) 1565.
- 13) 内川恵二, D. P. Andrews: 光学, **9** (1980) 96.
- 14) D. B. Judd and G. Wyszecki: *Color in Business, Science and Industry* (Wiley, New York, 1975).

Fig.8 Mean wavelength discrimination thresholds with simultaneous (●) and successive (○) comparisons, calculated by using data in Fig.4. Solid and dotted curves are theoretical wavelength discrimination functions derived from Boynton's opponent color model.

較の場合である。この同時および継時波長弁別閾値にフィットする理論波長弁別関数を反対色説に基づく Boynton の色覚モデルを用いて求めてみた。^{*} 実線が黒丸の測定点に最適にフィットするようにして最小二乗法で求めた理論関数である。この理論関数のうち 460 から 500 nm の波長範囲は $y - b$ 反対色システム、それ以外の波長範囲は $r - g$ 反対色システムによって決められる。破線は白丸の測定点に同じくフィットするように実線の理論関数を定数倍したものである。実線、破線の理論関数共に測定点との一致はかなりよいといえよう。継時比較による波長弁別関数(破線)は同時比較による場合(実線)と比べて結果として $y - b$ システムでは 2.4 倍、 $r - g$ システムでは 2.1 倍となり、 $y - b$ システムの方が $r - g$ システムより増大が多少大きく現われている。

このシステムによる色弁別能の違いは Fig.6 で示した純度弁別の劣化にも現われている。主波長 410 nm と 570 nm のテスト刺激は第三色覚異常者(tritanope)

* 理論関数の具体的な求め方は文献 1, p. 268~274 を参照。