

# 解説

## 視覚系の色チャンネルと明るさチャンネル\*

内川 恵 二

東京工業大学大学院総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1987年6月23日受理)

### Chromaticness and Brightness Channels in the Visual System

Keiji UCHIKAWA

Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology, Graduate School,  
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

#### 1. はじめに

われわれの視覚系は外界から情報を取り入れる際に、瞬時に視野内のすべての情報を取り入れてしまうわけではなく、眼球運動などにより、全体の情報のある範囲 $\rho$ 空間的にサンプリングして部分情報に分割し、部分情報を継時的に取り入れている。視覚系に入った部分情報は記憶され、次に入ってくる部分情報と統合されて最終的に一つの視覚像を形成する<sup>1,2)</sup>。さらに、獲得された視覚情報は脳内に長時間記憶され、新しい情報を知覚する際に利用される。このように、視覚系は情報の入力、記憶、比較や統合といったように、たえずダイナミックな情報処理をしているシステムであるといえる。

色情報も通常、継時的に視覚系に入力される場合が多い。たとえば、図1に示すように、2色A, Bを比較することを考えてみると、2色ともに網膜上色覚能力の優れた直径視角約 $2^\circ$ の中心窩で同時にとらえられることはほとんどない。そこで、われわれは前述したような眼球運動により、まずAを見て、次にBを見るということを行ない、記憶内で2色A, Bを比較している。

ここで図1に示されたような2色A, Bの比較のされ方をみると、色覚系の二つの重要な機能がそこに関与していることがわかる。一つは短時間内に網膜の同じ部位に入力してくる色刺激A, Bをそれぞれ別々の刺激として脳に伝える機能、もう一つは記憶内で2色を比較

し、その色差を知覚する機能である。前者では視覚の伝達系の時間応答特性、後者では記憶を用いた色差の検出能力が色覚のダイナミックなメカニズムを解明する上で問題となる。

最近の色覚メカニズムの研究では色情報は色(chromaticness)チャンネルと明るさ(brightness)チャンネルに分かれて伝達され知覚されることが明らかになっている<sup>3)</sup>。そこで本稿では以上の色覚の二つの機能の時間特性がこの色と明るさという二つのチャンネルにどのように表われているかについて、これまでの著者らの実験結果をまとめ、新たに考察してみる。

#### 2. 色チャンネルと明るさチャンネル

図2は色覚メカニズムのモデルの一例である<sup>4)</sup>。色刺激光はまずR, G, B 3種の錐体により視覚系に入力する。R, G, B 錐体はそれぞれ長波長、中波長、短波長にピーク値をもつ分光感度をもち、入力した色刺激光はここで3種の出力信号に変換される。錐体からの出力信号は次のレベルである2種の反対色システム y-b (黄-青), r-g (赤-緑) と1種の非反対色システム L (明暗あるいは白黒) に入力する。y-b, r-g システムは正負2極性の分光感度をもち、前者は+黄-青(または-黄+青)、後者は+赤-緑(または-赤+緑)のクロマティック(chromatic)成分<sup>\*1</sup>(略してC成分と呼ぶことにする)を抽出し伝達する。Lシステムは輝度システムと

\* 本稿は昭和61年度光学論文賞受賞記念講演(1987年3月29日, 早稲田大学本部)を骨子として、まとめたものである。

\*1 色は r-g, y-b, L 成分で表わされるが、クロマティック成分はL成分を除いた残りの r-g, y-b 成分を合わせた色味だけの成分である。

呼ばれ、中波長にピーク値をもつ一極性の分光感度を持ち、色刺激光の輝度 (luminance) 成分 (略してL成分) を伝える。色覚メカニズムの最も高次レベルは色刺激光の見えを与える H, S, Br システムでそれぞれ色相 (hue), 彩度 (saturation), 明るさ (brightness) に対応している。

色覚系の色チャンネルとは色刺激光のC成分を伝える

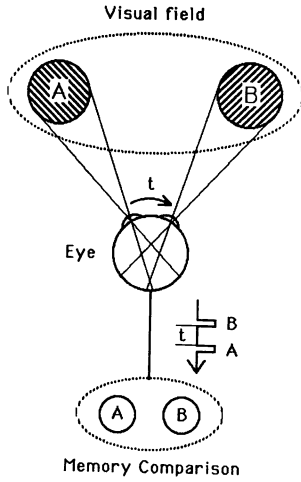


図1 2色A, Bの継時的な比較  
眼球運動により、中心窩でAを見て、次にt時間後にBを見る。2色A, Bは継時的に大脳へ伝達され、そこで記憶比較される。

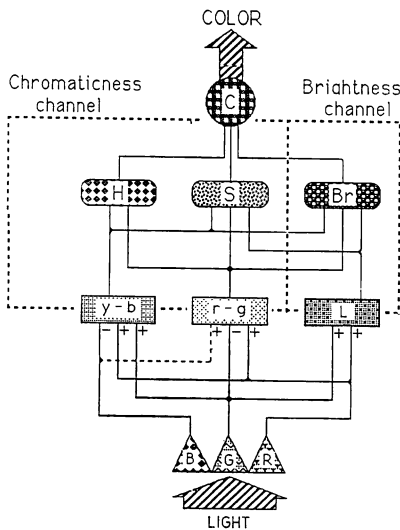


図2 色覚メカニズムのモデルの一例  
色チャンネル (chromaticness channel) と明るさチャンネル (brightness channel) が太破線によって示されている。詳しくは本文参照。

チャンネルのことで、図2中、左側の太破線で表わされている。明るさチャンネルは右側のLからBrに続くL成分を伝えるチャンネルのことである。これまでに数多くの心理物理学的、生理学的実験結果が報告され、色覚メカニズムがこのようなモデルで表わされることの根拠となっている<sup>3)</sup>。このモデルの大きな特徴は入力した色情報が二つのチャンネルによって、C成分とL成分に分けられて伝達されることであるが、この二つのチャンネルは時空間特性が大きく異なり、単に異種の成分を伝えることで異なるだけでなく、視覚情報処理上、質の違う役割を担っていると考えられている。

### 3. 色覚系の時間応答特性

色チャンネルと明るさチャンネルの時間応答特性を比較するには、入力する色刺激光のC成分とL成分を分離して、それぞれの成分の特性を測定する必要がある。図3にその測定原理を図示する。図3の上図は二つのテスト刺激 (単色光  $\lambda_1$ ) と参照刺激 (単色光  $\lambda_0$ ) とを時間的に入れ替えて同一視野 (右図) 内に呈示する様子を示している。 $\lambda_1$  と  $\lambda_0$  は等輝度にそろえ、入れ替えても輝度成分は変化しないようにする<sup>\*2)</sup>。したがって、図3の上図の呈示法では  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0$  によりLシステムの出力は変化せず、r-g, y-b システムの出力のみが変化することになる。

図3の下図ではテスト刺激の波長を参照刺激の波長  $\lambda_0$  と等しくとり、y-b, r-g システムからの出力には変

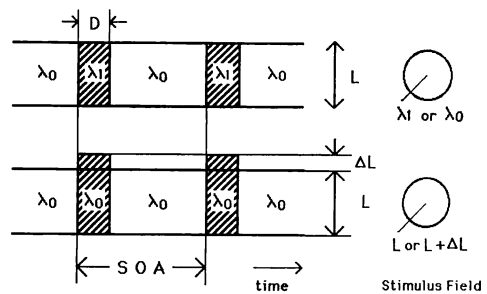


図3 クロマティック成分 (C成分) と輝度成分 (L成分) の時間応答特性を調べるための2刺激法  
上図では二つのテスト刺激 (斜線部)  $\lambda_1$  は参照刺激  $\lambda_0$  と等輝度 (L) にそろえてあり、C成分のみが変化する。下図ではテスト刺激の波長は参照刺激の波長と等しくとりC成分をそろえ、輝度が  $\Delta L$  だけ変化する。それぞれの右側に刺激視野を示す。

\*2  $\lambda_1$  と  $\lambda_0$  を等輝度にそろえるには、交照法 (flicker photometry) が用いられる。

化がないようにしてある。しかし、テスト刺激の輝度を参照刺激の輝度より  $\Delta L$  だけ大きくとり、テスト刺激と参照刺激の入れ替えにより、輝度変化、すなわちLシステムの出力の変化が生まれるようになっている。このようにして、C成分とL成分とを別々に取り出して刺激することができる。

図3上図、下図ともにテスト刺激の呈示持続時間は  $D$ 、1番目と2番目のテスト刺激の時間間隔は SOA (stimulus onset asynchrony) で示されている。被験者は二つのテスト刺激が呈示された後に、図3上図ではクロマティックネス (色相あるいは彩度) の変化、図3下図では明るさの変化を検出できたかどうかを応答する。

図4に実験結果の一例を示す<sup>9)</sup>。図4の上図、下図はそれぞれ図3の上図、下図の実験に対応し、SOA の変化に伴う  $\Delta\lambda$  または  $\Delta L$  の検出確率の変化を表わしている。図中、実線と破線の違いは設定した  $\Delta\lambda$  あるいは  $\Delta L$  の大きさの違いを示している。図4の上図では SOA が5から50 ms まで増大しても検出確率はほぼ一定で、その後 SOA が200 ms まで増大するにつれて大きく減少し、その後はまたほぼ一定値をとることが示

されている。これは二つのテスト刺激が呈示間の時間間隔が短いときには視覚系内でたし合わされ大きな応答を生じ、時間間隔が長くなるとたし合わされなくなり、応答も小さくなるために検出能も低下すると解釈できる。たし合せの時間幅は約200 ms ということができる。図4の下図では SOA が5から50 ms に増大するにつれて、検出確率は大きく減少し、その後 SOA が100 ms までは一時増大し、やがて一定値になるという変化の形状が示されている。この SOA=50 ms 付近で凹みのある変化は、二つのテスト刺激が SOA=50 ms 付近で互いに効果を減じ合うという抑制的なたし合せが生じているために起こると考えられる。

図4の上図、下図のC成分とL成分のたし合せ特性は明らかに異なっている。これから、波長差  $\Delta\lambda$  の刺激は興奮型 (正の興奮) の時間応答を視覚系の伝達経路内に引き起こすが、輝度差  $\Delta L$  の刺激は興奮型に続いて抑制型 (負の興奮) の時間応答も生むことが推論できる。さらに、色チャンネル内のC成分は時間的にゆっくりと伝達され、明るさチャンネル内のL成分は時間的により速く伝達される特性をもっていることがわかる。この特性は時間的変化の速い対象物に対しては、L成分のみが対応でき、C成分は対応できないことを意味している。しかし、図1で示されるように、網膜上の同じ部位に短い時間内で入力した二つの刺激A、Bでも混同されずに大脳まで伝達されるところをみると、C成分とL成分とが同時に変化する場合には、C成分もL成分と同じ速さで伝達されるようになるメカニズムの存在が示唆される。

#### 4. 色の記憶特性

網膜より入力し、視神経を通して大脳に運ばれた色情報は図2に示したように、最終的に色相、彩度、明るさとして知覚される。この大脳レベルでは色情報はどの程度正確に保持されるのであろうか。色チャンネルの出力と明るさチャンネルの出力とではその記憶のされ方が異なるのであろうか。

色Cは図5に示されるように3次元色空間中の1点として表示できる。図中、点Cの周囲の領域は弁別閾値  $\Delta C$  の範囲を示し、領域の中心点Cとこの範囲内の点は同じ色に見えることを意味している。ここで、記憶による色の変化を調べる場合、Cの弁別閾  $\Delta C$  で決まる領域が変化するかどうかと、中心点Cがシフトするかどうかといった二点が考えられる。領域の変化は色Cの見えの正確さの変化、中心点のシフトは色Cの見えそのものが

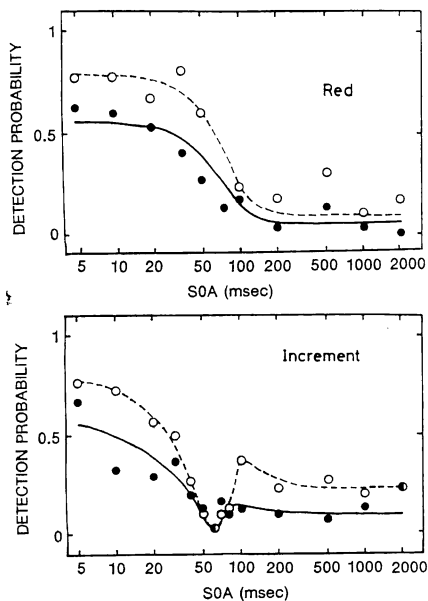


図4 C成分とL成分との時間的たし合せ特性  
上図、下図はそれぞれ図3の上図、下図の呈示法により求めた結果を示している。上図では  $\lambda_0=571$  nm,  $\Delta\lambda=\lambda_1-\lambda_0=20$  nm (○), 15 nm (●),  $L=100$  Td である。下図では  $\lambda_0=571$  nm,  $\Delta \log L=0.18$  (○), 0.14 (●),  $L=100$  Td である。実線、破線はそれぞれのデータ点を表わす理論曲線である。

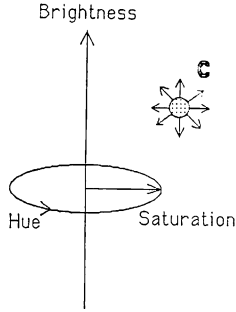


図 5 色 C の 3 次元色空間による表示  
色 C の周囲の領域は弁別閾値  $\Delta C$  の範囲を表わす。矢印は記憶内での色 C の変化の可能性 ( $\Delta C$  の変化と C 点のシフト) を示している。

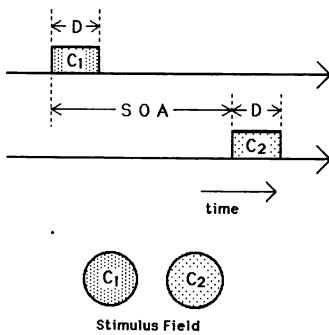


図 6 色  $C_1$  と  $C_2$  の継時比較法  
 $C_1$  と  $C_2$  は呈示持続時間  $D$ 、時間遅れ SOA で、それぞれの刺激視野 (下図) に呈示される。被験者は  $C_1$  と  $C_2$  の色差  $\Delta C = C_2 - C_1$  の検出を行なう。

変化することを表わしている。

記憶による色の変化を調べるには継時比較法が用いられている<sup>6-8)</sup>。これは、図 6 に示すように、二つの色刺激光  $C_1$  と  $C_2$  を継時的にそれぞれの視野 (下図) に呈示し、その時の色弁別閾値  $\Delta C = C_2 - C_1$  と  $C_1$  と等色する  $C_2$  の値を求めるものである。色相または彩度について調べる場合は、 $C_1$  と  $C_2$  をあらかじめ等しい明るさにそろえておき、 $\Delta C$  を色相または彩度のみが変化する方向に取る。明るさについて調べる場合は  $C_1$  と  $C_2$  の色相、彩度は等しくとり、 $\Delta C$  として  $C_1$  と  $C_2$  の輝度差をとる。図 6 の SOA をゼロにすると、 $C_1$  と  $C_2$  は同時比較になるが、継時比較により求められる  $\Delta C$  が同時比較の  $\Delta C_0$  よりどの程度変化するか、継時比較により  $C_1$  に等色した  $C_2$  が同時比較の場合の等色光  $C_{2,0}$  と比べてどの程度シフトしているかどうかを求める。

図 7 に波長弁別閾値  $\Delta \lambda$  の SOA による変化を測定

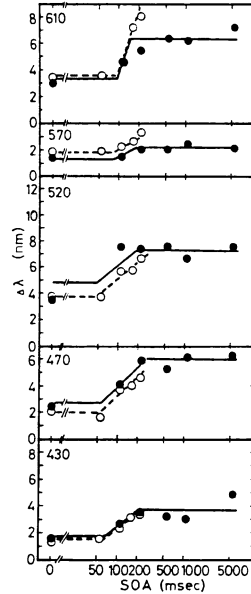


図 7 継時比較による波長弁別閾値  $\Delta \lambda$  の SOA に対する変化  
テスト刺激の波長はそれぞれのグラフの左上に示されている。呈示持続時間は 110 ms、●と○はセッションの違いを表わす。

した結果を示す<sup>6)</sup>。 $\Delta \lambda$  は近似的に色相方向の色弁別閾値  $\Delta C$  と考えることができる。図中、黒丸と白丸はセッションの違いを表わす。刺激の呈示持続時間  $D$  (図 6 参照) はここでは 110 ms である。図 7 をみると、 $\Delta \lambda$  はどの波長でも SOA が 50 ms 以上になると、増大をはじめ、SOA = 200 ms まで増大し、その後はほぼ一定値をとることがわかる。この結果はまず、記憶内での色相の保持時間は約 200 ms であるということ、次に、色相弁別は閾値で約 2 倍程度劣化するという二つのことを示している。また、継時比較による色相方向のシフトは観測されていない。彩度方向で継時比較により色弁別を行なった実験では彩度弁別も記憶内で閾値が約 2 倍程度に劣化することが示されている。しかし、彩度弁別の場合は、記憶による色の高彩度方向へのシフトが報告されている<sup>7)</sup>。

色情報の保持時間が約 200 ms という色の記憶の時間特性は、色チャンネル内の C 成分のたし合せの時間特性と類似している。時間的たし合せの時間幅内に呈示される二つの色刺激光は、視野の異なった部位に呈示されても、同じ部位に呈示されても、比較あるいはたし合せが容易にでき、共通のメカニズムの存在が示唆される。

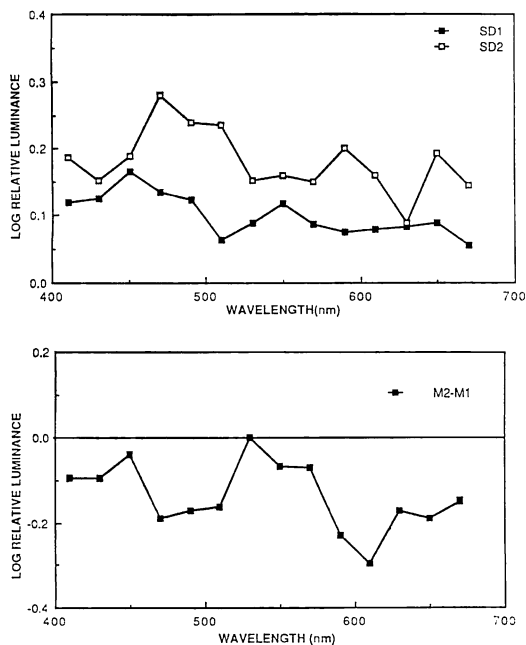


図8 継時比較と同時比較による明るさの弁別閾値(上図)と継時比較による明るさのシフト(下図)  
上図では■が同時比較, □が継時比較の弁別閾値  $\Delta \log L$  を表す. 下図では継時比較と同時比較による明るさのマッチング点の差を表す, 縦軸の負の値は継時比較のマッチング点の輝度が同時比較のものより小さいことを表す. 呈示持続時間  $D$  は 1 s, 時間遅れ SOA は 11 s である.

次に, 明るさの記憶を調べた実験結果の一例\*3を 図8に示す<sup>8)</sup>. 図8の上図はテスト刺激(単色光,  $C_1$ )の波長に対する参照刺激(白色光,  $C_2$ )の輝度弁別閾値  $\Delta \log L$ を表し, 黒と白のシンボルはそれぞれ同時比較と継時比較の結果を示している. 継時比較の弁別閾は明るさの比較の場合も約2倍に増大し, 色相, 彩度の弁別閾の増大と同程度であることが明らかにされている. 図8の下図は継時比較による明るさのシフトを示す結果で, 記憶内では色刺激の明るさは暗い方向にシフトすることが示されている.

図2の色覚メカニズムのモデルをみると, Br(明るさ)にはLシステムからの入力(L成分)のほかに y-b, r-g システムからの入力がかかっている. これは, 色刺激光の明るさに色チャンネルからC成分の寄与が

あることを示したもので, 実験的にも多くの証拠がある<sup>9-11)</sup>. また, S(彩度)はC成分とL成分の相対量で決まる量<sup>11)</sup>であるから, SにはLシステムからの入力がある. 継時比較による弁別閾値は色相, 彩度, 明るさのどの方向にも均等に増大したので, 色チャンネルと明るさチャンネルそれぞれのなかでの色情報の保持の精度には明らかな差は見られなかった. しかし, 記憶による色のシフトは, 色相方向にはなかったが, 明るさと彩度方向にはあったことを考えると, 記憶による色情報の保持は色チャンネルと明るさチャンネルの相互作用が変化するという特徴があり, C成分とL成分はかなり正確に保持されているということがいえそうである.

色チャンネルは明るさチャンネルに比べて前述した時間的分解能と同様に空間的分解能も劣っている<sup>9)</sup>. したがって対象物の形(エッジ)の知覚は主として明るさチャンネルを通して行なわれ, 色チャンネルは対象物の面の知覚に役立っていると考えられる. われわれの日常生活でのパターン認識を考えると, 形の知覚と同様に面の知覚も重要で, 背景からの対象物の切出しなどの機能に大きな影響を及ぼしていると思われる. 色チャンネルと明るさチャンネル内の成分は対象物を知覚するまでは, それぞれ特有の異なった役割をもっているが, 対象物がいったん知覚されると, 両チャンネル内の成分は同様の特性で保持されていくといえよう.

## 5. おわりに

視覚系のもつ基本的な構造である色チャンネルと明るさチャンネルの差異を時間特性について述べ, その意味を考察した. 人間の視覚情報処理の機能には, 光点の絶対閾の検出という視細胞レベルで決まる機能から, パターン認識という大脳の高次レベルが複雑に関与する機能まで, さまざまなレベルの機能があるが, どの機能も独立ではなく, すべてが密接に関係して複雑な視覚情報処理系を形成している. 明るさと色, あるいは形と面という二つの視覚系のチャンネルはすべてのレベルの機能に共通な基本的なメカニズムであろう.

## 文 献

- 1) M. Ikeda and K. Uchikawa: "Integrating time for visual pattern perception and a comparison with the tactile mode," *Vision Res.*, **18** (1978) 1565-1571.
- 2) M. Ikeda, K. Uchikawa and S. Saida: "Static and dynamic functional visual fields," *Opt. Acta*, **26** (1979) 1103-1113.
- 3) R. M. Boynton: *Human Color Vision* (Holt, Rinehart and Winston, New York, 1979).

\*3 ここで行なった明るさの比較は, 図6において  $C_1$  を単色光,  $C_2$  を白色光にした実験条件を用い, 異色明るさ比較 (heterochromatic brightness comparison) になっている.

- 4) 内川恵二: "色覚のメカニズム: 心理物理学的立場から", 光学, **15** (1986) 368-375.
- 5) K. Uchikawa and M. Ikeda: "Temporal integration of chromatic double pulses for detection of equal-luminance wavelength changes," J. Opt. Soc. Am. A, **3** (1986) 2109-2115.
- 6) K. Uchikawa and M. Ikeda: "Temporal deterioration of wavelength discrimination with successive comparison method," Vision Res., **21** (1981) 591-595.
- 7) K. Uchikawa: "Purity discrimination: successive vs simultaneous comparison method," Vision Res., **23** (1983) 53-58.
- 8) K. Uchikawa and M. Ikeda: "Accuracy of memory for brightness of colored lights measured with successive comparison method," J. Opt. Soc. Am. A, **3** (1986) 34-39.
- 9) K. Uchikawa, H. Uchikawa and P.K. Kaiser: "Equating colors for saturation and brightness: the relationship to luminance," J. Opt. Soc. Am., **72** (1982) 1219-1224.
- 10) K. Uchikawa, H. Uchikawa and P.K. Kaiser: "Luminance and saturation of equally bright colors," Color Res. Appl., **9** (1984) 5-14.
- 11) 内川恵二, 内川弘美: "等明るさ色光の輝度-彩度関数のモデル", 光学, **14** (1985) 468-471.