

研究

青色メカニズムの時間的足し合わせ特性と色応答モデル

吉沢 達也・内川 恵二・中野 靖久

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

(1993年2月4日受付, 1993年5月6日受理)

Temporal Integration Property of Chromatic Response Fed by Blue Mechanism and Chromatic Response Model

Tatsuya YOSHIZAWA, Keiji UCHIKAWA and Yasuhisa NAKANO

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

(Received February 4, 1993; Accepted May 6, 1993)

We tested whether the temporal chromatic response fed by the blue mechanism (a chromatic mechanism from S cone through y-b opponent channel) was different from those by the other chromatic mechanisms (chromatic mechanisms from L and M cone through opponent channel) with the isoluminant double-pulse integration method using a new apparatus with red, green and blue LEDs as sources. Test stimuli changed on the tritanopic confusion line from a white to the co-punctal point (T-Blue) or to a 567 nm monochromatic point (T-Yellow). Other test stimuli, which changed from the white to 630 nm monochromatic light (Red), were used for comparison. The detection thresholds were determined for these stimuli as a function of SOA (stimulus onset asynchrony) between two pulses. We derived summation index, which represented degree of temporal integration of chromatic response. It was obtained that the temporal integration characteristics for T-Blue was the same as those for Red. In contrast with previous studies, our results clearly show that the temporal response of blue mechanism is not different from those of the other chromatic mechanisms. In addition, we proposed a chromatic response model which was composed of three layers in order to account for our data.

1. はじめに

色覚メカニズムを解明する一つのアプローチとして色応答の時間的応答特性が心理物理学的¹⁻¹²⁾ および生理学的¹³⁻¹⁵⁾ に研究されてきた。これらの研究ではこれまで青色メカニズム (S錐体から黄-青反対色チャンネルを通る経路) の時間的応答特性が, 他の色メカニズム (LとM錐体から赤-緑反対色チャンネルを通る経路) のそれと異なるという結論が提案されていたが^{1-9, 13, 14)}, 最近ではL錐体メカニズム, M錐体メカニズム, S錐体メカニズム間または赤-緑反対色メカニズムと黄-青反対色メカニズム間での時間的応答特性には差が顕著にみられないという結果が多く報告されている^{10-12, 15)}。Schnapfら¹⁵⁾ は微小電極を用いてマカクザルのL, M, S錐体に対して

10.7 ms の単一刺激に対する応答を生理学的に調べ, 各錐体の時間応答特性には差がないことを報告している。Smithら¹⁰⁾やUchikawa and Ikeda¹¹⁾ は単一刺激や2刺激を用いて検出閾における時間的足し合わせ特性を調べ, 色刺激に対する時間的応答特性には明確な色相依存性が見られないことを報告している。また, 著者ら¹²⁾ は469 nm, 502 nm, 576 nm, 630 nmを主波長とする白色からの色度変化刺激に対する時間的足し合わせ特性を調べ, これらの色相の違いによる色応答の時間的足し合わせ特性にはほとんど差が見られないことを報告している。

このようにL, M, S錐体メカニズム間や赤-緑, 黄-青反対色メカニズム間での時間的応答特性の違いはあまりないことがわかってきたが, その中で青応答に関しては

他の色応答に比べると被験者間の差異が最も多い¹¹⁾など、いまだにはっきりした結論が得られていないことも事実である。青応答を得るために過去の研究では単に短波長光を刺激として用いているにすぎないが、青色メカニズムの特性を明確に求めるにはそれだけを選択的に刺激するような実験条件を設定することも必要であろう。そこで本研究では色応答と輝度応答を分離して調べることのできる等輝度2刺激法をトリタノピック混同色線上のテスト刺激に応用し、青色メカニズムを選択的に調べることとした。本手法では参照光として白色光を、テスト光としてトリタノピック混同色線上の等輝度の色光を用い、両者を継時的に置換呈示することにより、輝度の変化なしに色の変化だけの刺激を呈示するものである。テスト光をトリタノピック混同色線上で変化させるとL、M錐体の応答は一定でS錐体の応答だけが変化し、その結果青色メカニズムの応答だけを選択的に得ることができる。また、他の色メカニズムの時間特性と比較するために白色点からユニーク赤に近い630nm方向に変化する等輝度テスト光を用いた。

2. 実 験

2.1 刺 激

Fig. 1 に本研究で用いた赤 (r), 緑 (g), 青 (b) 色の3種のLEDおよび白色参照光 (w) を示す。色度座標はそれぞれ r (0.723, 0.276), g (0.363, 0.632), b (0.156, 0.231) および w (0.355, 0.416) である。本研究では Smith and Pokorny¹⁶⁾の混同色中心 p (0.1748,

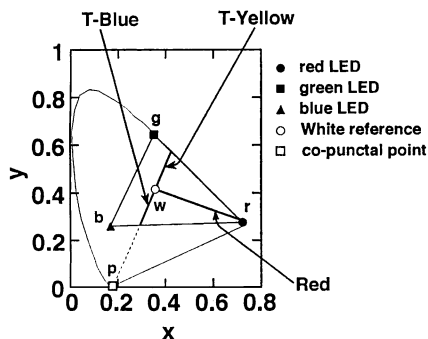


Fig. 1 CIE chromatic diagram: A filled circle (●), a filled square (■) and a filled triangle (▲) were coordinate of red, green and blue LED, respectively and an open circle (○) coordinate of white reference. An open square (□) was the co-punctal point. Red, T-Blue and T-Yellow changed on the solid lines through the white reference.

0) と白色参照光 w を通るトリタノピック混同色線上のテスト刺激光を用いた。トリタノピック混同色線上のテスト刺激光は w と p を結ぶ線上 (T-Blue) と w とトリタノピック混同色線上の p とは反対の方向の線上 (T-Yellow) の2テスト刺激から成る。トリタノピック混同色線上の色光は赤錐体と緑錐体の応答の比が常に一定となるので青錐体からの応答の変化を選択的に調べることができる。また、w から主波長 630 nm 方向へ変化するテスト刺激 (Red) を比較のために用いた。

Fig. 2 に各 LED を直交軸に持つ色空間を示す。各軸の単位は3種のLEDの輝度とする。この色空間で白色参照光 \vec{W} とテスト光 \vec{C} の輝度と等しい輝度を持つ等輝度平面上を考えると、 $\vec{C} - \vec{W}$ のベクトル \vec{dL} が色度変化テスト刺激となる。 \vec{dL} を各LEDの軸上に射影すると、それぞれの成分は dL_r , dL_g , dL_b となり、白色参照光を作る各LEDの輝度とテスト光を作る各LEDの輝度の差となる。テスト光の色度はこれら dL_r , dL_g , dL_b を変えることにより変化し、 $dL_r = dL_g = dL_b = 0$ の場合は白色参照光である。

等輝度2刺激法^{11,12,17)}は Fig. 3 に示すように二つのテスト色光 (C) が等輝度に設定された白色参照光 (W) に時間的に挟まれて同一視野内に継時的に呈示される手法である。Fig. 3 中の $R_w, G_w, B_w, R_c, G_c, B_c$ の記号はそれぞれ Fig. 2 のものに対応している。色応答の時間的足し合わせ特性はこの二つのパルスの呈示開始時間間隔 SOA (stimulus onset asynchrony) に対する視野内の変化の検出を測定することにより調べられる。SOA が短い時には二つのテスト光に対する視覚系の応答はオーバーラップして時間的に足し合わせが生じ、SOA が増加

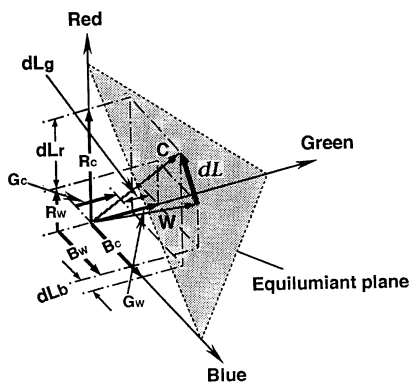


Fig. 2 Primary space: Equiluminant plane determined by axes of red, green and blue LED luminance. A vector dL was composed of dL_r , dL_g and dL_b .

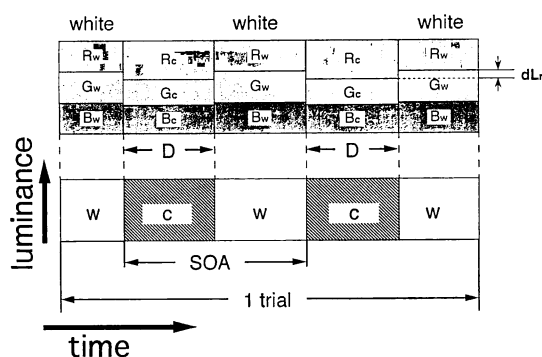


Fig. 3 Time course of stimulus presented by isoluminant chromatic double-pulse method. A white reference (W) was constituted by R_w , G_w and B_w which were luminance of three LEDs and a test chromatic light (C) by R_c , G_c and B_c . D and SOA were duration of chromatic lights and stimulus onset asynchrony between these chromatic lights, respectively.

するとともにその時間的な足し合わせは徐々に消失し、最終的に SOA がある値以上になると視覚系の応答は時間的に独立となると考えられる。したがって、検出閾を与える C と W の色度差 dL を測定することで足し合わせ特性を知ることができる。

白色参照光とテスト色光は各被験者ごと周波数 8~10 Hz の交照法によりあらかじめ等輝度に設定しておく。刺激は暗黒の中に視角 1.5° の円形で呈示される。刺激の網膜照度は 100 Td である。

刺激呈示持続時間 D は T-Blue, Red では 10 ms (被験者 YN では 20 ms) とした。T-Yellow の場合は $D=10$ または 20 ms とすると dL を装置上可能な範囲で最大にしても単一刺激を検出できないことが予備実験でわかった。そこで被験者 TY は $D=40$ ms, 被験者 YN, TS では 60 ms とした。呈示開始時間間隔 SOA は 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 600, 1000, 1500, 2000 ms の 17 種類とし、 D より短い SOA の条件は行わない。さらに白色参照光 W に挟まれるテスト光 C が 1 回だけ呈示される単一刺激条件、すなわち $SOA=0$ ms の場合も行った。

2.2 装置

本実験で用いた装置は 6 光路のマクスウェル視光学系であり、それぞれ 2 光路ずつ赤、緑、青色の 3 種の LED が光源として用いられている。従来、色メカニズムの時間的応答特性を測定する装置では刺激の時間的制御に電磁シャッターが用いられることが多く、シャッター開閉時の時間的なバラツキのために生じるわずかな輝度ず

れが色応答の時間的応答特性に影響を及ぼしている可能性があった。本装置では電気的に応答速度の速い LED を用いて、輝度ずれのない完全な等輝度色相置換刺激を作ることができる。

LED は空間的には一様に発光しないため、3 種類の LED からの色光を混色した後に透過性の高い拡散板を透過させることにより一様にし、発光むらによる変化の検出閾への影響を排除した。また、円形のアパーチャをマクスウェリアン・レンズの直前の混色光中に置き、刺激の切り替え時にアパーチャのエッジのわずかなずれが生じないようにした。

Fig. 2 と 3 に示すように各刺激は三つの LED の輝度比を変えることにより得られ、その輝度と呈示時間は制御回路を介して計算機によって制御される。LED は電流制御によりその輝度を変化させると分光分布が変化し¹⁸⁾、その結果色度が変わってしまう。そこで高周波フリッカー光の duty ratio (1 周期のフリッカー光のうち発光している時間の割合) を変えることで輝度を変えるようにした。被験者は歯型台により頭部を固定される。被験者からの応答はマウスにより自動的に計算機に取り込まれる。

2.3 被験者

色覚正常者の男性 3 名 YN (31 歳), TY (28 歳), TS (23 歳) を採用した。TY と YN は心理物理学実験の経験者であり、ともに著者である。TS は心理物理学実験は未経験な被験者である。

2.4 手続き¹²⁾

刺激呈示は約 2.5 秒の間隔中に行われる。被験者は計算機からの準備完了の合図のあと手元のマウスのボタンにより各試行を開始し、刺激呈示が終了した合図の後、この 2.5 秒間中に視野内に何らかの“変化”を検出したら YES, 検出しなければ NO と手元のマウスのボタンにより答える。

各被験者は実験開始前にマクスウェル視となるように歯型台の位置を調整する。また、刺激のエッジに色ずれが生じないように眼球の位置を合わせた。

各被験者は各テスト光に対し、130~160 試行からなるセッションを 10~14 セッション繰り返した。セッション内ではテスト光は T-Blue, Red, T-Yellow のうち一つに固定され、すべての SOA が試行ごとにランダムに選択される。テスト刺激光の白色光からの輝度差 dL は一つの SOA を 1 系列として、階段法¹⁹⁾により変化する。各セッションにおける刺激呈示の手順は、著者ら¹²⁾と同様な方法により行った。各 SOA の色度変化の検出

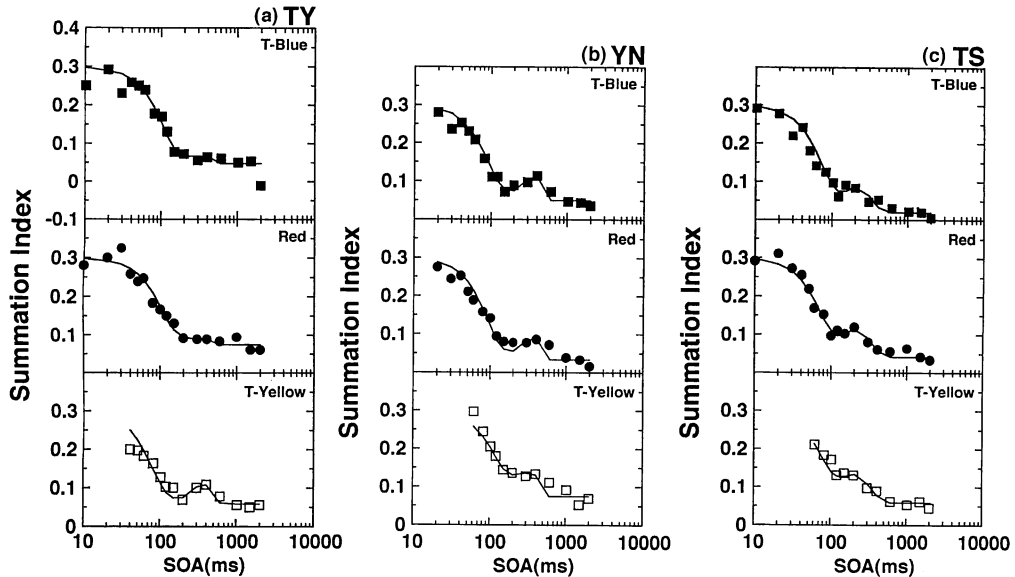


Fig. 4 Summation Index as a function of SOA. Upper, middle and lower panels were obtained in the condition of T-Blue, Red and T-Yellow, respectively. (a): TY, (b): YN, (c): TS. See text in details.

閾値は次のように恒常法により決定した。全試行を集計し、知覚確率曲線をプロビット法²⁰⁾により近似して YES の応答が 50% となる dL を閾値とした。

3. 結果と考察

ここでは 2 刺激光の足し合わせの程度を式(1)で定義される足し合わせ指数 (summation index) で表すことにする。足し合わせ指数は各テスト光の 2 刺激の時の各 SOA における閾値 dL_e を、同じテスト光の単一刺激の時の閾値 dL_s で正規化した値の逆数の対数値である*1。

$$\text{Summation Index} = -\log(dL_e/dL_s) \quad (1)$$

ここで dL_e と dL_s は Fig. 2 中のベクトル dL の大きさを表すが、足し合わせ指数を決めるためには赤、緑、青色の各 LED に対する dL_r , dL_g , dL_b のうち一つが求まればよい。Fig. 2 に示すように、あるベクトル dL の大きさと同じ方向のベクトル dL' の大きさの関係は、

$$\begin{aligned} \|dL\| : \|dL'\| &= |dL_r| : |dL_r'| \\ &= |dL_g| : |dL_g'| = |dL_b| : |dL_b'| \end{aligned}$$

となるからである。ここでは、T-Blue, Red, T-Yellow の足し合わせ指数の計算にはそれぞれ dL_b , dL_r , dL_b を用いた。

Fig. 4 (a), (b), (c) に結果を被験者別に示す。各図の上段、中段、下段はそれぞれ T-Blue, Red, T-Yellow の結果を示し、グラフの横軸は SOA (ms)、縦軸は足し合わせ指数である。図中の各シンボルはそれぞれのテスト光の結果を示し、実線は後述する色応答のモデルより計算された値である。

どの被験者においても T-Blue, Red では SOA が 10 から 20 ms では、足し合わせ指数が約 0.3 一定となり、二つの刺激に対する視覚系の応答が時間的に完全に足し合わされていることがわかる。さらに T-Yellow も含めて、SOA が 20 ms から 200 ms (TS では 120 ms) に増加するにつれて足し合わせ指数は減少し、足し合わせは部分的となる。SOA が 200 から 400 ms (TS では 120 から 200 ms) では足し合わせ指数は SOA の増加とともに再び上昇し、SOA が 400 から 600 ms (TS では 200 から 400 ms) では減少している。SOA が 600 ms (TS では 400 ms) 以上では、足し合わせ指数はある値でほとんど一定となり、二つの刺激に対する応答は独立で、確率的足し合わせが起きていることが示されている。足し合わせ指数の関数に SOA = 400 または 200 ms

*1 ある SOA の閾値での輝度差 dL_e が単一刺激の閾値 dL_s の 1/2 である場合は $\text{Summation Index} = -\log(1/2) = -\log 0.5 = 0.3$ となり、時間的に完全な足し合わせとなる。また、2 刺激が独立で、確率的な足し合わせがなければ、2 刺激の閾値が単一刺激の閾値と等しくなり ($dL_e = dL_s$)、足し合わせ指数は 0 ($= -\log 1$) となる。しかし、実際は確率的な足し合わせがあり、2 刺激が独立でも $\text{Summation Index} > 0$ となることが知られている²⁵⁾。

でピーク値が見られるという結果は過去の研究では報告されていない特性である。

上述したようにどの被験者とも T-Blue, Red, T-Yellow の足し合わせ指数の関数は全体的な特性では一致している。しかし、TY は T-Yellow では SOA=400 ms をピークとする足し合わせ指数の再上昇が T-Blue, Red よりも大きく現れている。また、YN の場合は T-Blue, Red では SOA=150 から 200 ms で足し合わせ指数が確率的足し合わせのレベルに近づいてから再び上昇するのにに対し、T-Yellow は SOA=200 から 400 ms では足し合わせ指数はほぼ横ばいとなっている。さらに、TS では T-Blue, Red, T-Yellow のピーク値となる SOA が他の 2 人よりも短くなっている。

どの被験者も T-Blue と Red の足し合わせ指数の関数はほとんど等しく、したがって、青色メカニズムの時間的応答特性が他の色メカニズムのそれと差があるとはいえないことがわかる。これは Smith ら¹⁰⁾や著者ら¹²⁾の結果とよく一致している。しかし、T-Yellow の足し合わせ指数の関数はどの被験者の場合も T-Blue と Red のそれとは異なった。これが T-Yellow の検出メカニズムの違いによるものか、刺激呈示持続時間を長くしたためによるものかは本研究では区別できないが、いずれにしても T-Yellow の違いは SOA が 400 か 200 ms でのピーク値は大小による差に起因している。

上で述べた足し合わせ指数関数のピークは本実験で初めて明らかとなった特性である。次に色覚モデルからこれを解釈してみることにする。Fig. 5 に結果の解釈に用いた新しい色覚モデルの模式図を示す。これは Uchi-

kawa and Yoshizawa¹⁷⁾ の提案した色チャンネルと輝度チャンネルに関するモデルを改良したものである。この色覚モデルは 3 層から成っており、第 1 層 (I) は錐体、第 2 層 (II) は反対色メカニズム、そして第 3 層 (III) は高次メカニズムである。第 1 層から第 2 層、第 2 層から第 3 層への興奮性の結合を実線で、抑制性結合を破線で表す。抑制性の出力は興奮性の出力に比べて時間遅れを伴う。まず各層からの出力の様子を定性的に Fig. 6 に示す。Red の場合、白色から等輝度変化をするため L 錐体には増分、M 錐体には減分刺激となり、M、L 錐体からはそれぞれ a_2 , a_3 で表される出力が反対色メカニズム M-L と L-M に送られる。第 1 層から第 2 層への抑制性結合の出力は結果として興奮性結合の出力と

Chromatic response

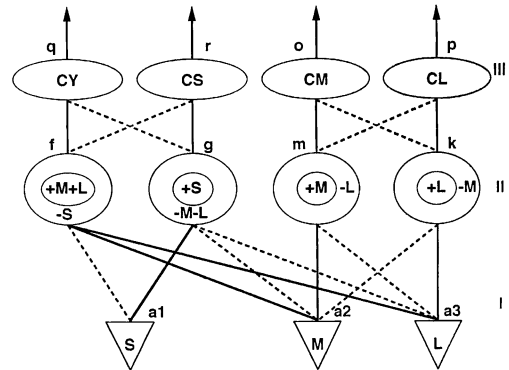


Fig. 5 A color vision model devised here to explain the present data. See text in details.

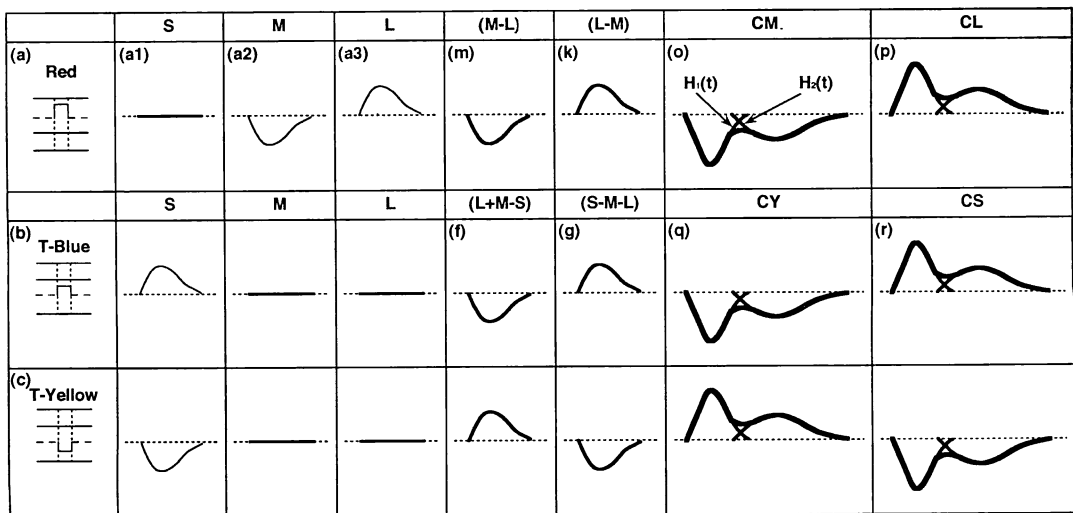


Fig. 6 Response types of each layer in the model in Fig. 5. See text in details.

同じ極性になり、それらを足し合わせた出力 m, k は単相性であるため、ここでは抑制性結合の出力の時間遅れは無視することにする*2. 反対色メカニズム M-L では a_2 と極性の反転した a_3 が統合される (m). 同様に反対色メカニズム L-M では a_3 と極性の反転した a_2 が統合される (k). 高次メカニズム CM には m と、さらに数段のローパスフィルタを通り極性の反転した k がある時間遅れの後送られる。そして最終的な色応答としてはこれら応答を足し合わせたものが出力される (o). T-Blue の場合はトリタノピック混同色線上で白色から等輝度変化をするため S 錐体のみに増分刺激となり、 a_1 出力のみが反対色メカニズム S-M-L と L+M-S に送られる。反対色メカニズム L+M-S では極性の反転した a_1 により f が出力される。反対色メカニズム S-M-L では a_1 により g が出力される。高次メカニズム CY には f と、さらに数段のローパスフィルタを通り極性の反転した g がある時間遅れの後送られる。そして最終的な色応答としてはこれら応答を足し合わせたものが出力される (q). 同様に T-Yellow も各高次メカニズムからの色応答が得られる。

上記のモデルにおける第3層からの出力は式(2)で与えられるインパルス応答 $H(t)$ を持つ n 段ローパスフィルタからの出力と仮定できる。

$$H(t) = H_1(t) + H_2(t - t_{d1}) \quad (2)$$

$H_1(t)$ は第2層から第3層への興奮性の出力、 $H_2(t - t_{d1})$ は t_{d1} の時間遅れをもつ第2層から第3層への抑制性の出力である。各応答 $H_i(t)$ は式(3)で与えられる^{11,12)}。

$$H_i(t) = (A_i / \tau_i) (t / \tau_i)^{n_i - 1} \exp\{-t / \tau_i\} / (n_i - 1)! \quad (3)$$

ここで、 A_i は比例定数、 τ_i は時定数、 n_i はフィルタの段数を表す。ここで、刺激 $I(t)$ の大きさから足し合わせ指数を導出するために Uchikawa and Yoshizawa¹⁷⁾ と同様に以下のような計算を行う。刺激 $I(t)$ によって生じる応答 $R(t)$ は式(4)で表される。

$$R(t) = \int_0^t I(t') H(t - t') dt' \quad (4)$$

次に閾値を決定するために、式(5)で表される確率的寄せ集めのモデル²¹⁾により検出確率 $P = 0.5$ となる刺激 $I(t)$ の大きさを求める。

$$P = 1 - \exp\left\{-\int_0^T |R(t)|^p dt\right\} \quad (5)$$

*2: Uchikawa and Yoshizawa, 1992 のモデルでは第1層から第2層への出力は輝度変化 Δinc の刺激の時には2相性の出力となるため抑制性結合の時間遅れを考慮する必要がある。

Table 1 Parameters of impulse response to fit data.

		TY	YN	TS
T-Blue	τ_1	35	30	25
	τ_2	55	55	40
	n_1	3	3	3
	n_2	7	7	6
	A_1	1	1	1
	A_2	0.2	0.7	0.5
	t_{d1}	100	100	70
	β	6	6	15
Red	τ_1	35	30	25
	τ_2	55	55	40
	n_1	3	3	3
	n_2	7	7	6
	A_1	1	1	1
	A_2	0.15	0.6	0.6
	t_{d1}	100	100	70
	β	4	9	7
T-Yellow	τ_1	25	40	25
	τ_2	55	55	40
	n_1	3	3	3
	n_2	7	7	6
	A_1	1	1	1
	A_2	0.65	0.5	0.6
	t_{d1}	100	100	70
	β	5	4	5

ここで β は実験的に求まる値で、 T は十分長くとり $R(T)$ がゼロになるように決めた。Table 1 は結果のグラフに最もよくフィットする τ_i, A_i, n_i, β の値である。Fig. 4 中の実線はこのフィットにより求められた値である。

ここで、Fig. 4 中で SOA が 400 ms (TS では 200 ms) のとき足し合わせ指数の値が確率的寄せ集めの値とは本質的に異なるのか、また、実験的に得られた SOA が長いときの足し合わせ指数が確率的な寄せ集めの値と一致するか検討する。単一刺激の検出確率を p とすると2刺激のどちらか一方が検出される確率 P_w は

$$P_w = 1 - (1 - p)^2 \quad (6)$$

で表される。知覚確率 0.5 であるときの輝度差を閾値としているので、 $P_w = 0.5$ とすると式(6)より $p = 0.293$ となる。この値を単一刺激の閾値を求めた知覚確率曲線に当てはめ dL_e を求め、式(1)に代入すると確率的寄せ集めによる足し合わせ指数が計算できる。この計算結果を Table 2 に示す。Table 2 の上段 (peak) は実験

Table 2 Summation index of probability summation in each experimental condition.

		TY	YN	TS
T-Blue	peak	0.068	0.114	0.085
	calculation	0.164	0.052	0.053
	model	0.050	0.050	0.020
Red	peak	0.089	0.086	0.118
	calculation	0.089	0.049	0.102
	model	0.075	0.033	0.043
T-Yellow	peak	0.109	0.131	0.133
	calculation	0.064	0.072	0.097
	model	0.060	0.075	0.060

より得られた SOA=400 ms (TS は SOA=200 ms) のピーク値を, 中段 (calculation) は上記の手順で求められた計算値を, そして下段 (model) は上述の色覚モデルにより得られた SOA=2000 ms のときの値をそれぞれ各刺激条件について被験者ごと示している. TY は Red の場合は色覚モデルから得られた足し合わせ指数 (model) と単一刺激より確率的寄せ集めにより計算された値 (calculation) が一致し, SOA=400 ms の実験より得られた足し合わせ指数 (peak) は calculation より大きい. T-Yellow の場合は model と calculation がほぼ一致し, peak は calculation と等しい. しかし, T-Blue の場合 calculation の値は 0.164 で peak や

model の値より大きい. YN は T-Blue, Red, T-Yellow の場合 model と calculation はよく一致し, peak は calculation よりいずれも大きい. TS は T-Blue の場合 model と calculation は多少差があるが, peak は calculation より大きい. Red, T-Yellow の場合は calculation の値は model の値より大きい, peak は calculation より大きい. また, TY の T-Blue と TS の Red, T-Yellow の calculation の値が大きいのは, 知覚確率曲線の傾きが緩やかであり, 傾きが急な場合に比べて dL_e が小さくなるためである. これらの例外はあるが全体的には model と calculation がほぼ一致し, peak は calculation より大きい. 前者は確率的寄せ集めの大小を決める β の値が適切であることを示し, 後者はピーク値が確率的寄せ集めだけでは説明できないことを示す. このことから上述の色覚モデルによる解釈が必要となる.

各テスト光に対する足し合わせ指数を導出するときに用いたインパルス応答 $H(t)$ を被験者ごとに Fig. 7 (a), (b), (c) に示す. 各図の縦軸と横軸はそれぞれインパルス応答の相対振幅と時間である. 太線は高次メカニズムから出力されるインパルス応答 $H(t)$ であり, 細線はそれぞれ各応答 $H_1(t)$ と $H_2(t)$ を示す. Table 1 から明らかであるが, 3人の被験者ともに T-Blue, Red のインパルス応答はほとんど等しく, T-Yellow に対するインパルス応答のみがやや異なっている. TY の場合,

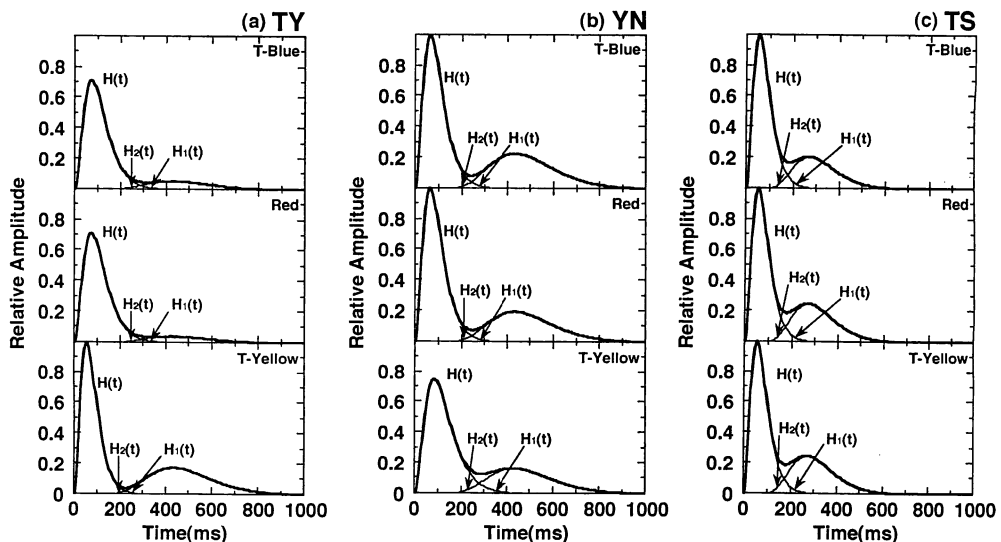


Fig. 7 Impulse response functions in the condition of T-Blue, Red and T-Yellow were shown by thick lines. Thin lines represent component $H_1(t)$ and $H_2(t)$. (a) : TY, (b) : YN, (c) : TS. See text in details.

T-Blue, Red では 70 ms, T-Yellow では 50 ms に最初のピーク値を持ち, 330 または 230 ms まで減衰した後, 450 または 420 ms に2番目のピーク値を持つようなインパルス応答である. YN の場合は T-Blue, Red では 80 ms, T-Yellow では 60 ms に最初のピーク値を持ち, 420 または 430 ms に2番目のピーク値を持つようなインパルス応答となる. TS の場合は前者の2人より急峻なインパルス応答であり, T-Blue, Red, T-Yellow ともに 50 ms に最初のピーク値を持ち, 260 ms に2番目のピーク値を持つことがわかる. これらのインパルス応答を与えるパラメータ τ_1, τ_2 (Table 1) は過去の研究結果^{12,17)}にもよく類似している.

この色覚モデルにおける反対色メカニズムから高次メカニズムへの結合は青色メカニズムと他の色メカニズムの応答を統一的に説明するために必要である. 反対色メカニズムからの出力が最終的な色応答として得られると仮定すると Red の場合インパルス応答 $H(t)$ の $H_1(t)$ と $H_2(t)$ はM錐体とL錐体からの出力 a_2, a_3 より生成されると考えることができる. 一方, T-Blue と T-Yellow はS錐体からの出力 a_1 だけが反対色メカニズムに送られることになり, $H_1(t)$ または $H_2(t)$ のどちらか一方だけしか得られない. そこで, T-Blue と T-Yellow の場合, 高次メカニズムの出力 q または r の $H_1(t)$ と $H_2(t)$ はそれぞれ, 二つの反対色メカニズム L+M-S と S-M-L の出力 f と g から生成され, Red の場合も同様に高次メカニズムの出力 o または p の $H_1(t)$ と $H_2(t)$ はそれぞれ, 二つの反対色メカニズム L-M と M-L の出力 m と k により生成されると考える必要がある. また, Table 1 で示した τ_{d1} は反対色メカニズムにおける錐体からの抑制性の結合と考えるには長すぎるため, 反対色メカニズムから高次メカニズムへの抑制性結合と考える必要がある. 生理学的および心理物理学的研究から反対色型細胞の中心と周辺的时间遅れは数十 ms である²²⁻²⁴⁾ことが調べられている. このことからこの時間遅れが反対色メカニズムから高次メカニズムへの過程で生じると考えるのが妥当であろう.

4. ま と め

本研究ではトリタノピック混同色線上の色光に対する色応答の時間的足し合わせを測定し, 630 nm を主波長とする色光に対する色応答のそれと比較した. その結果これらのテスト光の違いによる色応答の時間的足し合わせ特性に大きな違いはないことがわかった. このことは従来言われてきた青色メカニズムの時間的応答が他の色

メカニズムよりも遅いという見方を考え直す必要があることを指摘するものである. 今後は, 各色メカニズムの位相特性についても調べ, それらの時間特性を総合的に解明することが課題である.

文 献

- 1) R. W. Bowen, D. T. Lindsey and V. C. Smith: "Chromatic two-pulse resolution with and without luminance transients," J. Opt. Soc. Am., **67** (1977) 1501-1507.
- 2) D. Regan and C. W. Tyler: "Temporal summation and its limit for wavelength changes: An analog of Bloch's law color vision," J. Opt. Soc. Am., **61** (1971) 1414-1421.
- 3) G. S. Brindley, J. J. Du Croz and W. A. H. Rushton: "The flicker fusion frequency of the blue-sensitive mechanism of colour vision," J. Physiol., **183** (1966) 497-500.
- 4) D. G. Green: "Sinusoidal flicker characteristics of the color-sensitive mechanism of the eye," Vision Res., **9** (1969) 591-601.
- 5) D. H. Kelly: "Spatio-temporal frequency characteristics of color-vision mechanism," J. Opt. Soc. Am., **64** (1974) 983-990.
- 6) J. J. Wisowaty and R. M. Boynton: "Temporal modulation sensitivity of the blue mechanism: Measurements made without chromatic adaptation," Vision Res., **20** (1980) 895-909.
- 7) M. E. Breton: "Hue substitution: Wavelength latency effects," Vision Res., **17** (1977) 435-443.
- 8) R. W. Bowen: "Latencies for chromatic and achromatic visual mechanisms," Vision Res., **21** (1981) 1457-1466.
- 9) K. Uchikawa and M. Ikeda: "Wavelength discrimination with chromatically alternating stimulus," Color Res. Appl., **10** (1985) 204-209.
- 10) V. C. Smith, R. W. Bowen and J. Pokorny: "Threshold temporal integration of chromatic stimuli," Vision Res., **24** (1984) 653-660.
- 11) 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.
- 12) 吉沢達也, 内川恵二: "色応答の時間的足し合わせ特性の色相間比較", VISION, **5** (1993) 1-9.
- 13) R. M. Boynton and D. N. Whitten: "Selective chromatic adaptation in primate photoreceptors," Vision Res., **12** (1972) 855-874.
- 14) R. M. Boynton and W. S. Baron: "Sinusoidal flicker characteristics of primate cones in response to heterochromatic stimuli," J. Opt. Soc. Am., **65** (1975) 1091-1100.
- 15) J. L. Schnapf, B. J. Nunn, M. Meister and D. A. Baylor: "Visual transduction in cones of the monkey macaca fascicularis," J. Physiol., **427** (1990) 681-713.
- 16) V. C. Smith and J. Pokorny: "Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm," Vision Res., **15** (1975) 161-171.
- 17) K. Uchikawa and T. Yoshizawa: "Temporal responses of chromatic and achromatic changes in-

- ferred from temporal double-pulse integration," J. Opt. Soc. Am. A, 1992 (accepted).
- 18) T. Watanabe, N. Mori and F. Nakamura: "A new superbright LED stimulator: Photodiode-feedback design for linearizing and stabilizing emitted light," Vision Res., **32** (1992) 953-961.
 - 19) T.N. Cornsweet: "The staircase-method in psychophysics," Am. J. Psychol., **75** (1962) 485-491.
 - 20) D.J. Finney: *Probit Analysis* (Cambridge University Press, 1971).
 - 21) A.B. Watson: "Probability summation over time," Vision Res., **19** (1979) 515-522.
 - 22) P. Gouras and E. Zrenner: "Enhancement of luminance flicker by color-opponent mechanisms," Science, **205** (1979) 587-589.
 - 23) W.H. Swanson, T. Ueno, V.C. Smith and J. Pokorny: "Temporal modulation sensitivity and pulse-detection thresholds for chromatic and luminance perturbations," J. Opt. Soc. Am. A, **4** (1987) 1992-2005.
 - 24) B.B. Lee, P.R. Martin and A. Valberg: "Amplitude and phase of responses of macaque retinal ganglion cells to flickering stimuli," J. Physiol., **414** (1989) 245-263.
 - 25) R.M. Boynton, M. Ikeda and W.S. Stiles: "Interaction among chromatic mechanisms as inferred from positive and negative increment thresholds," Vision Res., **4** (1964) 87-117.