

色応答の時間的足し合わせ特性の色相間比較

吉沢達也・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

(1992年9月1日受付, 1992年11月12日改訂受付, 1992年11月20日受理)

Comparison of Temporal Integration of Chromatic Responses among Different Hues

Tatsuya YOSHIZAWA and Keiji UCHIKAWA

Tokyo Institute of Technology Graduate School

4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

It has been argued in the previous studies whether temporal properties of chromatic response are different among the chromatic mechanisms. In this investigation, we measured temporal integration properties of chromatic responses with the isoluminant chromatic double-pulse method. Red, green, blue and yellow chromatic changes from a white were used as test stimuli. Their dominant wavelengths were 630, 502, 469 and 576 nm, respectively. Duration of stimuli were set at 10 ms for red, green and blue pulses and 40 or 50 ms for the yellow pulse. SOA (Stimulus Onset Asynchrony) were chosen from 10 to 2000 ms. The retinal illuminance of all stimuli was 10 Td. The threshold for detecting chromatic change was determined as a function of SOA by the constant stimuli method. It is shown that the temporal integration characteristics of double pulse were not so different among red, green, blue hues. We could not obtain reliable results for yellow hue, probably because of a temporal artifact of our apparatus. We also calculated impulse response functions for red, green and blue hues by using a model based on n-stage low-pass filter and probability summation.

1. はじめに

人間の色覚メカニズムに関する研究は古くから行なわれ、3種の錐体視細胞からの出力は2つの反対色チャンネル(赤-緑チャンネルと黄-青チャンネル)と輝度チャンネルによってさらに高次のレベルへと伝達されることが知られている。さらに心理物理学的研究^{1,2)}や生理学的研究^{3,4)}により、輝度チャンネルの方が色チャンネルよりも時間的分解能が高いことが知られている。Kelly and van Norren⁵⁾は輝度チャンネルの

MTF (Modulation Transfer Function) は 860 Td の網膜照度では 10 Hz 付近の周波数でピークを示し、約 42 Hz の CFF (Critical Fusion Frequency) を持つのに対し、色チャンネルの MTF はほとんどローパス型の形状を示し、CFF も約 30 Hz と小さい値となっていることを示している。また、Schwartz and Loop⁶⁾ は色チャンネルを刺激したときには刺激のゆっくりとした変化を知覚するのにに対し、輝度チャンネルを刺激した場合にはステップ的な早い変化を知覚することを報告し

ている。

一方、色チャンネルについてはその時間特性に波長依存性があると主張する報告と、それとは逆に波長依存性はないとする報告がある。等輝度色相置換法を用いてBreton⁹⁾やBowen¹⁰⁾は単色光に対する潜時(物理的な刺激のonsetから視覚系が応答するまでの時間)は刺激波長により異なることを示した。Bowen¹⁰⁾は時間的分解能に波長依存性があり、明らかに短波長のパルスに対する時間分解能が高いことを報告している。しかし、これらの研究では単波長光を刺激として用いているため、波長依存性が色相によるものか彩度によるものかが分離されていない。また、Regan and Tyler¹¹⁾やUchikawa and Ikeda¹²⁾は等輝度色相置換法による波長弁別を調べ、青メカニズムの時間的分解能がよくないことを報告している。これに対して、Smithら¹³⁾やUchikawa and Ikeda¹²⁾は単一パルスや2パルスを用いた時間的足し合わせ特性から色応答に対する時間特性には明確な色相依存性は見られないことを報告している。

もし色応答の時間特性が色相によって異なるならば、赤-緑、黄-青の2つの色チャンネルの時間特性が異なっている可能性が生じるが、色相によらず同じならば、2つの色チャンネルの時間特性は等しいことになる。これは両チャンネルの色応答が色相によって変化し¹³⁾、たとえば、ユニーク赤またはユニーク緑付近の色相の色光ではほとんど赤-緑チャンネルのみが応答し、ユニーク黄またはユニーク青付近の色相の色光ではほとんど黄-青チャンネルのみが応答することから色相によらず色応答の時間特性が等しければ、両チャンネルの時間的応答特性も等しいことになるからである。黄-青チャンネルが赤-緑チャンネルよりも時間的分解能が低いという考え方が一般化されるような傾向もあり^{14),15)}、この問題に決着を付けることは基礎的にも応用的にも極めて重要なことと考えられる。

このような背景から、本研究では色チャンネルは色相の違いによって、その時間特性に差が

あるかどうかを調べることを目的とした。ここでは、色チャンネルだけを選択的に調べるのできる等輝度2刺激法による時間的足し合わせ特性を測定した¹⁶⁾。本手法は等輝度に設定された参照光とテスト光と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。本実験では参照光として白色光を、テスト光としてユニーク色に近い赤、緑、黄、青の4つの色相を用いた。この理由は、白色は赤-緑チャンネルの出力と黄-青チャンネルの出力が均衡の状態であり、その点からテスト光の彩度のあるユニーク色相の方向に変化させるとその色相に優位に応答する色チャンネルの応答がそれに伴って変化するため、選択的にその色チャンネルの応答を得ることができるためである。これに対し色度座標上のある任意の色度点(白色以外)を参照光としてテスト光を任意の方向に変化させた場合は彩度と色相がともに変化するため2つの色チャンネルの応答がともに変化し、どちらか一方の色チャンネルの応答の変化を調べることができない場合があることになる。

2. 実験方法

2.1 実験原理

等輝度2刺激法は、図1に示すように輝度が

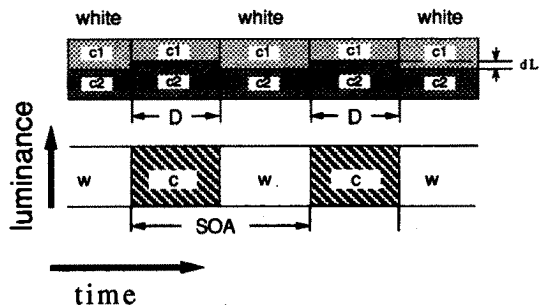


図1 等輝度2刺激法により呈示される刺激の時間過程。c1, c2は白色参照光(W)とテスト光(C)を作る単色光を示す。Dは刺激呈示持続時間、SOAは2刺激の呈示開始時間間隔を示す。dLは白色参照光とテスト光との間の単色光c1あるいはc2の輝度差を示す。

等しい白色参照光(W)とテスト光(C)を継時的に同一視野に置換呈示する方法である。時間的な輝度変化が存在しないため色チャンネルの応答の変化だけを選択的に調べることができる。ここで十分に短い呈示持続時間Dをもつテスト光を考えると、それに対する視覚系内の応答はある時間的な幅を持つ。もし1発目のテスト光と2発目のテスト光との呈示開始時間間隔SOAが長いときは2つのテスト光による視覚系内の応答は時間的に独立であり、色みの変化を検出するために必要な彩度は、1発だけのテスト光に対する色みの変化を検出するのに必要な彩度と同じである。SOAが短くなると2つのテスト光に対するそれぞれの応答がオーバーラップして部分的に足し合わされるようになるため、色みの変化を検出するために必要な彩度は1発だけのテスト光に対するそれより低くなる。さらにSOAを短くすると2つのテスト光に対する応答はほぼ完全に時間的に足し合わされるため、色みの変化を検出するために必要な彩度は1発だけのテスト光に対するその半分になると考えられる。そこでSOAのどのような値のときに

時間的足し合わせが生じるようになるかを測定することで、色応答の時間応答特性を調べることができる。

2.2 実験装置

図2に示した500Wのキセノン・ランプLSを光源とする4光路のマックスウェル視光学系を用いた。4光路のうち、2光路(ch3とch4)は白色参照光を、残りの2光路(ch1とch2)はテスト光を作るために使用している。各光路では、キセノン・ランプからの光がモノクロメータMC1, MC2または干渉フィルタF1, F2により単色光となり、光学ウェッジW1, W2, W3, W4を通る。光学ウェッジはパルスモータにより回転し、計算機により制御されている。各光路で生成された単色光は、ビーム・スプリッタBS1, BS2により混色される。テスト光と白色参照光の呈示は計算機によって制御されるメカニカル・シャッタS1, S2により行なわれる。シャッタの開閉の立ち上がり時間は平均0.39 ms, 立ち下がり時間は平均0.90 msである。被験者Subは歯型台により頭部を固定される。

2.3 刺激

図1の上段で示すように、本実験ではすべての刺激を2単色光c1, c2の混色により作った。本実験で調べる赤, 緑, 青, 黄の4種類のテスト刺激光(以後, それぞれRed, Green, Blue, Yellowと呼ぶ)は表1で示すc1, c2の組み合わせにより作られる。したがってRed, Greenは色度図上で単色光502 nmと630 nmの色度点を結ぶ軸上の混色光, BlueとYellowは単色光469 nmと576 nmの色度点を結ぶ軸上の混色光になる。白色参照光は両軸の交点(x, y)=(0.355,

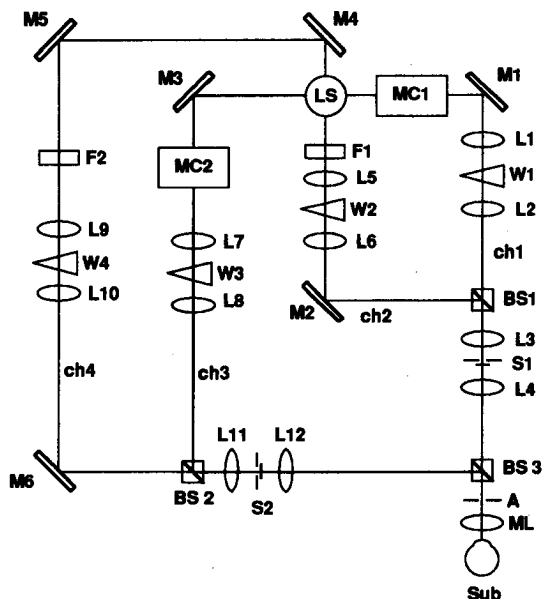


図2 4チャンネルのマックスウェル視光学系からなる実験装置図。詳細は本文を参照。

表1 Red, Green, Blue, Yellowのテスト光を作る単色光の組み合わせ

Test Stimulus (C)	c1 (nm)	c2 (nm)
Red	502	630
Green	630	502
Blue	576	469

c1, c2は図1中の上段の図に対応している。

0.416)とした。テスト光は図1に示すように、各単色光の輝度差 dL を変えることによりその色みを変化させる。 $dL=0$ は白色参照光となる。

白色参照光と各軸上から細かくサンプリングされた色光を各被験者ごとに周波数8~12Hzの交照法により等輝度に設定した。実際のテスト光はこのようにして等輝度にされた色光の中から選ばれる。刺激は視角 1.5° の円形で、周囲は暗黒である。刺激の網膜照度は 10 Td である。

刺激呈示持続時間 D は Red, Green, Blue では 10 ms とした。Yellow の場合、Red, Green, Blue の場合と同様に $D=10\text{ms}$ とすると dL を最大にしてテスト光をスペクトル光にしても(図1において、 C が $c1$ あるいは $c2$ のみで作られる)単一パルスを検出することができないことが予備実験でわかった。このことは Pokornyら¹⁷⁾の色刺激を検出するための刺激呈示持続時間の閾値が色相置換モードの場合 570 nm で約 67 ms となり最も大きくなることとも一致している。そこで、ここでは予備実験を行い、単一パルスが検出できる D として被験者 TY では 40 ms 、被験者 YN, IK では 50 ms を採用した。また、Yellow との比較のために、Red の実験を Yellow と同じ D に設定して繰り返した。呈示開始時間間隔 SOA は $10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 200, 300, 400, 600, 1000, 1500, 2000 \text{ ms}$ の17種類をとり、さらに $\text{SOA}=0$ すなわち単一パルスの条件を含めた。

2.4 被験者

色覚正常者の男性3名 YN (30才), TY (27才), IK (24才) を用いた。YN は心理物理学実験の経験者であり、TY は著者の一人である。IK はナイーブな被験者である。

2.5 手順

被験者は計算機からの合図のあと手元の押しボタンにより各試行を開始する。1試行ではあるテスト光があるSOAで呈示される。刺激呈示が終了した合図の後、被験者は呈示された刺激に“色みの変化”を検出したらYES、検出しなけ

れば NO と手元の押しボタンにより答える。このような色みの変化を判断基準に用いる理由はたとえ刺激の中にシャッタの非同期によるわずかな輝度変化が生じた場合でも、色チャンネルだけを選択的に調べることができるからである¹⁸⁾。

1セッションは130~160回の試行からなり、セッション内ではテスト光は一定で、すべてのSOAが試行毎にランダムに選択される。各SOAについて、テスト刺激光の白色光からの輝度差 dL は staircase法(階段法)¹⁹⁾により変化する。Staircase法の各系列ではYESと答えたらテスト光の彩度が小さくなるように dL を変え、NOと答えたら大きくなるように次の試行のテスト光が呈示される。1ステップで変化させる dL の値は各被験者に対して予備実験を行ない、知覚確率曲線が5~7ステップで0~100%まで変化するようにして決定した。各系列の初期値として閾上または閾下のテスト光が呈示される。また、各系列では一試行前のYES, NOの応答と現試行のYES, NOの応答が異なると次の試行では系列は折り返す。例えば、一試行前の応答がNOで現試行の応答がYESならば、次の試行ではテスト光の彩度を小さくし、一試行前の応答がYESで現試行の応答がNOならば、次の試行ではテスト光の彩度を大きくする。すべての系列(SOA)の折り返し回数が4回になるとそのセッションは終了となる。

被験者は各テスト光に対して10~14セッション繰り返した。最後にすべての応答を合計して知覚確率曲線を求め恒常法による閾値決定を行なうようにした。各ステップの試行数は知覚確率が50%付近では20~30回、0あるいは100%付近でも最低5回になるようにした。知覚確率曲線はプロビット法²⁰⁾により近似し、YESの応答が50%のときの dL の値を閾値とした。

3. 実験結果

各テスト光の各SOAにおける dL の閾値 dL_e を、同じテスト光の単一パルスの時の dL の閾値 dL_s で正規化した値を基にした式(1)の

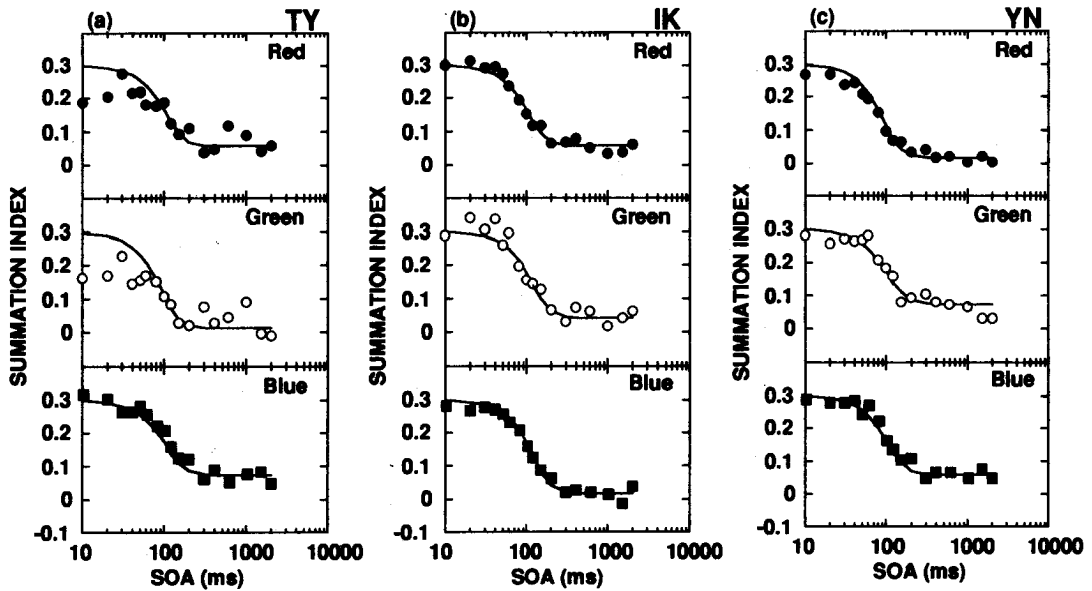


図3 Red, Green, Blueのテスト光の場合の時間的足し合わせ結果. 縦軸は summation index, 横軸はSOA (ms)である. $D=10$ ms. 図中の●, ○, ■はそれぞれ Red, Green, Blueの結果を示し, 実線は考察で述べるモデルにより計算した値である. 被験者 (a): TY, (b): IK, (c): YN.

summation index*により結果を表示する.

$$\text{summation index} = -\log(dLe/dLs) \dots\dots (1)$$

図3 (a), (b), (c)にRed, Green, Blueのテスト光の結果を被験者別に示す. グラフの横軸はSOA, 縦軸はsummation index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, 実線は考察で述べるモデルより計算された値である.

図3に示したRed, Green, Blueの結果は, どのテスト光でも, また, すべての被験者に対してSOA=10~40 msではsummation indexがほとんどの場合約0.3で一定であり, 2つのパルスに対する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. SOA=50~300 msではSOAが長くなるとともにsummation indexも小さくなり, 足し合わせは部分的となる. SOA=300 ms以上

ではsummation indexはある値一定となり, 2つのパルス光は時間的に足し合わされていないことがわかる. 被験者 TY のRed, Greenの場合, SOAが短い部分(10~40 ms)でsummation indexが0.3にならずに約0.2一定となっていている点は他の2人の被験者の結果と異なっている.

図4 (a), (b), (c)にそれぞれの被験者のYellowとRedのテスト光の結果を示す. ただし, D は40あるいは50 msである. Yellowの結果は, SOA=40 (50) ~約80 msの短い値のときにどの被験者もsummation indexが0.3以上となり, 単一パルスの閾値の半分以下の輝度差 dL で閾値に達してしまっていることを示している. Summation indexはSOAが100~300 msでは徐々に減少し, SOAが300 ms以上ではほとんど一定

*あるSOAの閾値での輝度差 dLe が単一パルスの閾値 dLs の1/2である場合, すなわち完全な足し合わせが起きる場合は $\text{summation index} = -\log(1/2) = -\log 0.5 = 0.3$ となる. また, 2パルスが独立で確率的な足し合わせがなければ, 2パルスの閾値が単一パルスの閾

値と等しくなり, $dLe = dLs$ で $\text{summation index} = -\log 1 = 0$ となる. しかし, 実際は確率的な足し合わせがあり, 2パルスが独立でも $\text{summation index} > 0$ となることが知られている

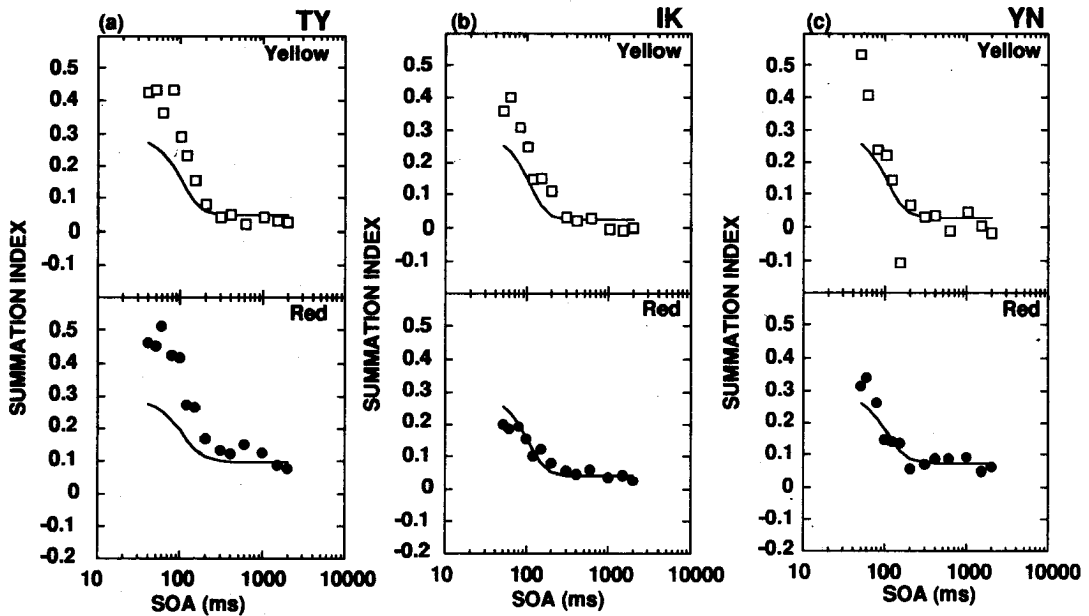


図4 Yellow, redのテスト光の場合の時間的足し合わせ結果. $D=40$ ms (TY), 50 ms (IK, YN). グラフの両軸は図3と同じ. 図中の□, ●はそれぞれYellowとRedの結果を示し, 実線は考察で述べるモデルを基に計算した値を示す. 被験者 (a): TY, (b): IK, (c): YN.

となっている. このYellowの場合と等しい刺激呈示持続時間 D を用いたRedの結果が下段の図である. 被験者 TY では, Yellowと同じようにSOAが $40 \sim 100$ msではsummation indexが 0.3 以上になっている. SOA= 300 ms以上でsummation indexがほぼ一定になり, これはRed ($D=10$ ms)の場合と同じ傾向である. また, このRed ($D=40$ ms)とYellow ($D=40$ ms)の時間的足し合わせ特性はよく一致している. IK の場合はSOAが 100 ms以下でsummation indexが 0.3 以上にはならず, 全体的にRed ($D=10$ ms)の結果とよく一致している. しかし, Red ($D=50$ ms)の結果はSOA= 300 ms以上ではYellow ($D=50$ ms)と一致した傾向を示すが, SOAがそれより短い値のときはあまりよく一致していない. YNの場合はSOA= $50 \sim 80$ msのときにsummation indexが約 0.3 になっているが, 全体的にはRed ($D=10$ ms)の結果を約 0.05 log unit上方向にシフトしたものと一致し, 両者の結果はよく類似している. また, Yellowとの比較では, SOA= $50, 60$ msの点を除けば, かなりよい一致を示している.

4. 考察

図3の結果より, どの被験者でもRed, Green, Blueのテスト光に対する色応答の時間的足し合わせ特性にはほとんど差がないことがわかる. これらの色応答の時間的足し合わせが生じなくなるSOAは, その色相の違いにかかわらず約 300 msである. また, 3人の被験者間でもよい一致が見られた. そこで各色応答の時間的足し合わせ特性から次の解析により, インパルス応答関数を求めてみた. 色応答を式(2)で表さ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する.

$$H(t) = (1/\tau) (t/\tau)^{n-1} \exp[-(t/\tau)] / (n-1)! \cdots (2)$$

ここで, τ は時定数, n はフィルタの段数を表す.

ここで, 刺激 $I(t)$ によって生じる応答 $R(t)$ は式(3)のような畳み込み積分で表される.

$$R(t) = \int_0^t I(t') H(t-t') dt' \cdots \cdots (3)$$

次に式(4)で表されるWatsonの確率的寄せ集めのモデル²¹⁾により閾値が決定されると仮定する. P を検出確率とすると,

$$P = 1 - \exp[-\int_0^T |R(t)|^\beta dt] \dots \dots \dots (4)$$

となる。ただし、 β は実験的に求まる値で、 T は十分長くとり $R(T)$ が0になるように決めた。式(4)は時間的足し合わせの一般的な式であり²⁾、 β が ∞ ならば絶対ピーク値検出器、 β が2ならばパワー積分器になる。ここでは P が0.5になるための刺激 $I(t)$ の大きさから summation index を計算で求め、その値が結果のグラフに最小二乗法で最もよくフィットする n , τ , β を決定するを行なった。結果としてえられた n , τ , β を表2に示す。図3中の実線はこの最適フィットにより求められた値である。

図5に各被験者毎にRed, Green, Blueに対するインパルス応答 $H(t)$ を示す。縦軸がインパルス応答の相対振幅で、横軸は時間である。TYはRedとBlueは同じインパルス応答であり、Greenもよく似ている。IKとYNは、それぞれGreenとBlueが同じインパルス応答で、Redも良く似ている。これより、Red, Green, Blueとも50~100 msにピーク値を持ち、100~200 msで半分値に減衰するような極めてよく似たインパルス応答であることがわかる。

図4のYellowの場合はSOAが小さいとき(40または50~80 ms)に他の色応答の場合より極めて大きな時間的足し合わせを示した。

この原因として次のようなことが考えられる。まず、本実験装置は、テスト光と白色光の時間交替にメカニカル・シャッタを切り替えたため機械的なずれが生じ、その結果わずかな時間的な輝度変化が生じる場合もあった。この輝度の小振幅パルスによる応答も時間的に足し合わされ、それが色応答の出力に加えられることも考えられる。Yellowのテスト光の569nmは彩度が最小の領域の波長であり、色の変化と輝度の変化の違いが見分けにくい。そのため、569 nmを主波長とするテスト光による色応答がその影響を最も強く受けたと考えられる。また、輝度応答は時間特性がよいので、SOAが小さいときだけこの小輝度変化が影響したと考えられ

表2 各テスト光に対するインパルス応答の各パラメータ値

Subject	Stimulus	n	τ (msec)	β
TY	Red	3	35	5
	Green	3	30	20
	Blue	3	35	4
IK	Red	3	35	5
	Green	3	40	7
	Blue	3	40	15
YN	Red	3	30	15
	Green	3	35	4
	Blue	3	35	5

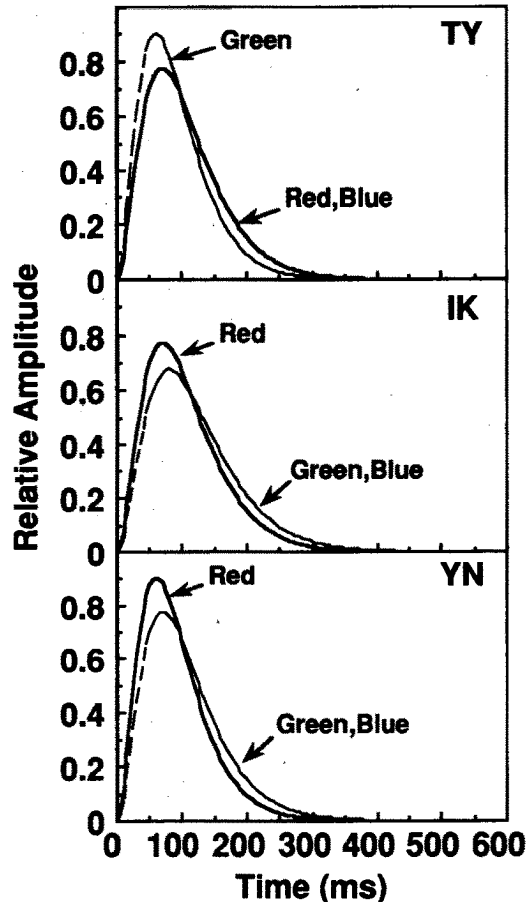


図5 Red, Green, Blueのインパルス応答。縦軸は相対振幅を、横軸は時間(ms)を示す。上段は被験者TYで、実線はRedとBlue、破線はGreenのテスト光の場合を示す。中段は被験者IKで、実線はRed、破線はGreenとBlueのテスト光の場合を示す。下段は被験者YNで、実線はRed、破線はGreenとBlueのテスト光の場合を示す。

る。もう1つの可能な原因として、テスト光の刺激呈示持続時間が長くなったことによりSOAの短いときに足し合わせ効果が増大するような非線形性のメカニズムが考えられる。刺激呈示持続時間が10 msのように短い場合は、SOAが短い時に色みの変化を検出できる閾値が単一パルスの閾値の半分であるのに対して、40または50 msと長くなるとSOAが短いときには色みの変化を検出することができる閾値は、足し合わせ効果が増大するため単一パルスのその半分より小さくなるためと考えられる。ただし、被験者TY以外ではYellowの場合のみこの効果が現われ、Redの場合には現われていない。この原因に関してはさらに詳しく検討が必要であろう。

ここでは表2に示してある代表的な値の $n=3$, $\tau=35$ msを用いて $D=40$ または50 msとして、図4の結果のグラフに計算結果をプロットしてみるととどめた。 β の値はデータ点に目でフィットするように変化させた。結果はYellowの場合SOA=40 (50)~200 msの短いときは実験値と実線とはあまりよく一致していないが、SOAが300 ms以上ではほぼ一致し、時間的に足し合わせが生じなくなるSOAの値は約300 msといえよう。また、これらの傾向は3人の被験者に共通している。Yellowの刺激呈示持続時間Dと等しいRedの場合もYellowと同様SOAが約300 msで時間的に足し合わせが生じなくなっていることがわかる。

本実験結果より、白色より赤、緑、青方向の色度変化に対する色応答の時間的特性には差がないことがわかった。ただし、黄方向は装置上の限界もあって結果が明らかではなく、さらに検討する必要がある。このような結果は、青応答の時間応答特性が他の色応答のそれと異なるものとしたこれまで報告されてきた結果には反するものであるが、Smithら¹⁴⁾の結果とはよく一致している。とくに青メカニズムの時間特性については、議論が多いのでトリタノピック(二色型第三色覚異常)な混同色線上で変化する刺激光を採用するなどして青メカニズムだけを選択

的に刺激する方法を用いて、さらに詳細に調べる必要がある。

5. まとめ

本研究では、469 nm (Blue), 502 nm (Green), 576 nm (Yellow), 630 nm (Red)それぞれを主波長とする、白色からの色度変化刺激光に対する時間的足し合わせ特性について調べた。その結果、Red, Green, Blue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は見られないことがわかった。ただし、576 nmに対する色応答については、SOAの短いところで完全な足し合わせ以上の足し合わせ効果が得られるなど、その他の色応答にみられない特性が観察された。

この特性が本実験で用いた装置に依存する輝度のartifact(白色参照光とテスト光の時間的置換時の機械的シャッタの開閉により生じるわずかな輝度ずれ)によるものか、呈示持続時間の効果か、あるいはYellow特有の特性かを明らかにするためには輝度artifactを伴わない刺激呈示装置が必要である。これは装置の改良を伴うために現段階では行うことができなかった。今後の課題である。

謝辞

本研究を始める際に貴重なアドバイスならびにご助力を頂いた珠川清巳君(現在富士写真フィルム株式会社所属)に感謝致します。

文 献

- 1) R. W. Bowen, D. T. Lindsey and V. C. Smith: Chromatic two-pulse resolution with and without luminance transients. *Journal of the Optical Society of America*, 67, 1501-1507, 1977.
- 2) D. H. Kelly and D. van Norren: Two-band model of heterochromatic flicker. *Journal of the Optical Society of America*, 67, 1081-1091, 1977
- 3) P. E. King-Smith and D. Carden: Luminance and opponent-color contributions to visual detection and adaptation and to temporal and spatial integration. *Journal of the Optical Society of America*, 66, 709-717, 1976.

- 4) D. Regan and C. W. Tyler: Temporal summation and its limit for wavelength changes: An analog of Bloch's law color vision. *Journal of the Optical Society of America*, **61**, 1414-1421, 1971.
- 5) S. H. Schwartz and M. S. Loop: Differences in temporal appearance associated with activity in the chromatic and achromatic systems. *Perception and Psychophysics*, **33**, 388-390, 1983.
- 6) P. Gouras: Identification of cone mechanisms in monkey ganglion cells. *Journal of Physiology*, **199**, 533-547, 1968.
- 7) P. H. Schiller and J. G. Malpeli: Functional specificity of lateral geniculate nucleus laminae of rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology*, **41**, 788-797, 1978.
- 8) M. E. Breton: Hue substitution : Wavelength latency effects. *Vision Research*, **17**, 435-443, 1977.
- 9) R. W. Bowen: Latencies for chromatic and achromatic visual mechanisms. *Vision Research*, **21**, 1457-1466, 1981.
- 10) K. Uchikawa and M. Ikeda: Wavelength discrimination with chromatically alternating stimulus. *Color Research and Application*, **10**, 204-209, 1985.
- 11) V. C. Smith, R. W. Bowen and J. Pokorny: Threshold temporal integration of chromatic stimuli. *Vision Research*, **24**, 653-660, 1984.
- 12) K. Uchikawa and M. Ikeda: Temporal integration of chromatic double pulses for detection of equal-luminance wavelength changes. *Journal of the Optical Society of America A*, **3**, 2109-2115, 1986.
- 13) D. Jameson and L. M. Hurvich: Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. I. Chromatic responses and spectral saturation. *Journal of the Optical Society of America*, **45**, 546-552, 1955.
- 14) 坂田晴夫：視覚の色度の時間周波数特性：色度弁別感度。電子通信学会論文誌, **63-A**, 451-456, 1980.
- 15) 坂田晴夫：視覚の色度時間周波数特性：閾上値の網膜部位による見え方。電子通信学会論文誌, **67-A**, 805-810, 1984.
- 16) K. Uchikawa and T. Yoshizawa: Temporal responses of chromatic and achromatic changes inferred from temporal double-pulse integration. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992 (submitted).
- 17) J. Pokorny, R. W. Bowen, D. T. Williams and V. C. Smith: Duration thresholds for chromatic stimuli. *Journal of the Optical Society of America*, **69**, 103-106, 1979.
- 18) J. J. Wisowaty: Estimates for the temporal response characteristics of chromatic pathways. *Journal of the Optical Society of America*, **71**, 970-977, 1981.
- 19) T. N. Cornsweet: The staircase-method in psychophysics. *American Journal of Psychology*, **75**, 485-491, 1962.
- 20) D. J. Finney: Probit analysis. Cambridge University Press, 1971.
- 21) A. B. Watson: Probability summation over time. *Vision Research*, **19**, 515-522, 1979.
- 22) J. A. J. Roufs and F. J. J. Blommaert: Temporal impulse and step responses of the human eye obtained psychophysically by means of a drift-correcting perturbation technique. *Vision Research*, **21**, 1203-1221, 1981.