

## 第2節 実験5：反対色システムの順応の時間的側面：閾上事態

-transient hue cancellation法を用いて-

### § 1. 目的

著者はこれまで報告した実験の中で、さまざまな持続時間のテスト刺激を観察する機会を得た。それらはテスト刺激であるから被験者はその強度を常に閾値付近の強度に調整しているが、確率的に定義される閾値強度よりわずかに高い強度に保つことも多かった。そのような時、持続時間の長いテスト刺激（ほぼ200 msec以上）は、観察している間にその色及び明るさが変化することが度々であった（明るさの変化は常に減少の方向であった）。刺激の物理的強度は変化していないから、このような変化は我々の視覚系の側に生じていたことは明らかである。刺激の色及び明るさが、比較的短い時間内（500msec以内）で変化するという現象は、これまで分析してきた反対色システム（及び加算的システム）の働きの時間的側面を示していると考えられる。本節の実験5及び第3節の実験6では刺激の色味の変化について、また第4節（実験7）では刺激の明るさの変化について調べた。

刺激の持続時間によって知覚される色も変化することは古くから知られている。色名法(color-naming)を用いた研究によると、各色名の出現率は刺激の持続時間に強く依存する(Boynton & Gordon, 1965)。またいわゆるユニーク色相(unique hue)も刺激の持続時間が短くなると、強度に対して、不変でなくなるし(Savoie, 1973; Nagy & Zacks, 1977; Nagy, 1979)。Bezold-Brücke現象における色

相シフト(hue shift)もまた刺激の提示時間に依存する(Nagy, 1980)。持続時間によって知覚される色が変わるから、色対比(color contrast)(Kinney, 1965; Valberg, 1974)あるいは波長弁別(Regan & Tyler, 1971; Siegel, 1965)も又持続時間によって異なるのは当然である。

しかしそれらの結果では、「刺激の持続時間によって色の見えが異なる」ことは示されても、実質的な「刺激の持続時間の関数」とはなっていない。本実験では、刺激の色の見えの変化をできるだけ時間的経過に沿ってかつ量的に検討するために、これまでの研究とは異なった方法を用いた。

それは瞬時的色相打ち消し法(transient hue cancellation method)とも呼ぶべきもので、持続時間の短い(かつ常に一定の)光(打ち消し光)によって、さまざまな持続時間のテスト刺激の色相(hue)を打ち消す方法である<sup>3・2・1)</sup>。打ち消し光は時間的にテスト刺激のどの部分にも重ねることが可能であるが、ここではテスト刺激の時間的に最後の部分に提示して、そのoffが両刺激とも常に同期する方法をとった(図3.2.1b参照)。この方法は、異なった研究目的ではあるが、Katzの方法(Katz, 1964)またはco-termination法(Higgins & Knoblauch, 1977; White & Rinalducci, 1981)と呼ばれている方法と似ている。

---

3.2.1) こうしたユニーク色相(660 nmの赤を除く)の組合せによる色相打ち消しでは、打ち消しがなされた時に得られる色(end color)は大部分が灰色であった。従って本実験では、テスト刺激の色相だけでなく、その飽和度をも打ち消していたことになる。

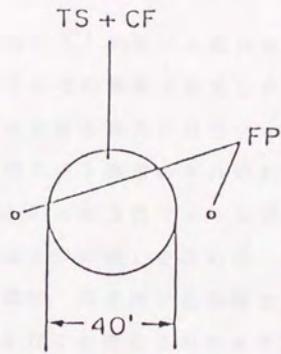
この瞬間的色相打ち消し法では、そのままでは「色の見え」の変化を直接捉えることはできない。本実験ではテスト刺激の色相の主要な成分である、「赤味」、「黄味」、「緑味」及び「青味」の時間的变化を、その色相を打ち消すのに必要な打ち消し光(それぞれのテスト刺激の反対色から成る)の強さ(エネルギー量)で個別に測定した。その際、刺激の持続時間が短くなると主観的な明るさも変化するから、予め予備実験で刺激の主観的明るさが変わらないようにその強度を調節した等明るさ条件(equal-brightness)及び主観的明るさが持続時間によって変わる等輝度(equal-luminance)条件の二つを設けた。

## § 2. 方法

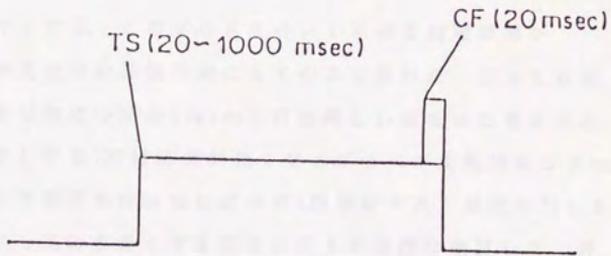
### 2. 1 装置と刺激

光学系装置は先の実験で用いたものと同じである。刺激パターンの空間的配置(a)及び時間的關係(b)を図3.2.1に示した。テスト刺激(TS)および打ち消し光(CF)は共に40'の円形で、空間的に重ねあわせた。基本的な条件においては、テスト刺激(Tλ)と打ち消し光(Cλ)の色(波長)の組み合わせは赤(660nm)/緑(500nm)、緑(510nm)/赤(660nm)、黄(580nm)/青(460nm)、青(460nm)/黄(580nm)であった。両刺激とも小さな赤色光点(FP)の中央部に提示した。

テスト刺激の持続時間は20msec~1sec(一部の条件では2sec)にわたって6段階に変化させたが、打ち消し光の持続時間は常に20msecとし、図3.2.1(b)にあるようにそのoffがテスト刺激のoffに常に同期



(a)



(b)

図3.2.1 (a)刺激の空間的配置及び(b)時間的關係

するようにした。又全ての条件で刺激間の時間間隔(ISI)は2secとした。

<等明るさ条件>では、各色のテスト刺激がその持続時間によって主観的明るさが変わらないようにその強度を調整した。そのためには予備実験に於いて、並置された同形同大の白色フィールド( $1\text{cd}/\text{m}^2$ , 定常提示)と、各波長のテスト刺激のそれぞれの持続時間で明るさのマッチングを行い、 $1\text{cd}/\text{m}^2$ の白色フィールドと等しい明るさに感じられる時の強度(ウェッジの値)を求めた。本実験ではテスト刺激の持続時間を変える度に、強度が予備実験で求めた値になるようウェッジを調節した。なおこの明るさのマッチングは被験者MHに対してのみ行い、被験者MJMに対してはMHで求めた強度値を適用した。

<等輝度条件>では、<等明るさ条件>で求めた持続時間が20msecの時の強度を他の持続時間にもそのまま用いた。従って各波長のテスト刺激は持続時間が20msecの時は等しい明るさに見えたが、( $1\text{cd}/\text{m}^2$ の輝度と等価)持続時間が長くなるにつれて主観的明るさは増大した。この等輝度条件は先に述べた4種類のテスト波長に対してそれぞれ打ち消し光の波長をさまざまに変えて詳細に検討した(被験者MHのみ)。表3.2.1は本実験で用いた光の波長の条件である。

## 2. 2 被験者

MH(著者自身)及びMJM(男48歳, 英国人)の2名が参加した。両被験者とも心理物理学実験には多くの経験がある。MHは全セッションを通して参加し、MJMは<等明るさ条件>のみ参加した。MJMは視力、

表3.2.1 本実験で用いられた条件

	テスト波長(Tλ) 打ち消し波長(Cλ)	
	660nm	500nm
等明るさ条件 (equal-brightness)	510 460 580	660 580 460
等輝度条件 (equal-luminance)	660 510 460 580	500 (480~540) 660 (600~680) 580 (560~600) 460 (440~480)

(10nmステップ\*)

色覚ともに正常であった。

## 2. 3 手続き

被験者の課題は常に打ち消し光(CF)の強度を調節して、テスト刺激(TS)の色相を打ち消すことであった。TSの各波長及び持続時間ごとに調整法を用いてCFの強度を求めた。一度に6回ずつ測定を行い、後日セッションを繰り返したので以下に示すデータの各点は計12回の測定値の平均である。

持続時間の異なるテスト刺激の色味を上の方法で打ち消す課題は予想以上に容易であった。持続時間が短い場合には、CFの強度をうまく調節すると、テスト刺激の出現時にもはやその色相は失せていた。この時テスト刺激の色は、刺激の波長の組合せにかかわらず、灰色に近い色であった。刺激の青／黄(又はその逆)条件では、用いられた刺激がいずれもユニーク色相に近い色相であるため、打ち消しが生じた時の色が灰色になったのは十分予想できる。一方赤／緑(又はその逆)条件の場合には、緑色光はユニーク緑に近い色相であるのに対し赤色光には多少の黄味成分が含まれていると考えられるので、打ち消し時には「理論的には」黄色が生ずるはずである。それがやはり灰色に近い色であったのは、赤色光(660 nm)はユニーク赤ではないにしてもそれに近い色相を与える十分に長い波長であること及び刺激の強度が弱いこと、等が理由として考えられる。しかしいずれにしても色相打ち消し法に於いて重要なことは、テストフィールドに「どのような色(end color)ができるか」ではなく、「テスト刺激の色相も打ち消し光の色相も共に感じられなくなる点を

求めること」である (Jameson & Hurvich, 1955).

一方、テスト刺激の持続時間が長い場合には、打ち消しが行われるとフィールドが消える直前にその色相が変化した。しかし依然として打ち消されない状態であれば、そうした色味の変化は伴わずにフィールドは消えた。このフィールドが消える直前の色味の変化はかなりはっきりしており、被験者はこれを基準として打ち消しの判断を求めることができた。

### § 3. 結果

図 3.2.2 は <等明るさ条件> で、各波長のテスト刺激と  $1 \text{cd/m}^2$  の白色フィールドとの明るさのマッチングを行った時の強度 ( $I$ )・持続時間 ( $t$ ) を  $t$  に対してプロットしたものである (被験者 MM)。パラメータはテスト波長で、各曲線は見やすいように適当に上下にずらしてある。曲線のあてはめは前と同じ方法によった。この曲線は本論文のこれまでの実験でしばしば用いられてきた明るさの時間加重を示す曲線である。前と異なる点は、以前の実験では閾値に於ける時間加重であったのに対し、ここでは閾上 (明るさ) に於ける時間加重であるということである。点線で示されている持続時間は臨界持続時間  $t_c$  であり、それぞれ上から 151, 126, 114, 132 msec であった。閾値事態に比べ波長による  $t_c$  の差は小さいものの、短波長と長波長で大きく、中間の波長で小さいという傾向は同じであった。

図 3.2.3 は被験者 MM の、<等明るさ条件> の結果である。テスト刺激の色相を打ち消すのに要した打ち消し光の強度 (エネルギー) を、テスト刺激の持続時間に対しプロットした。パラメータはテスト刺激

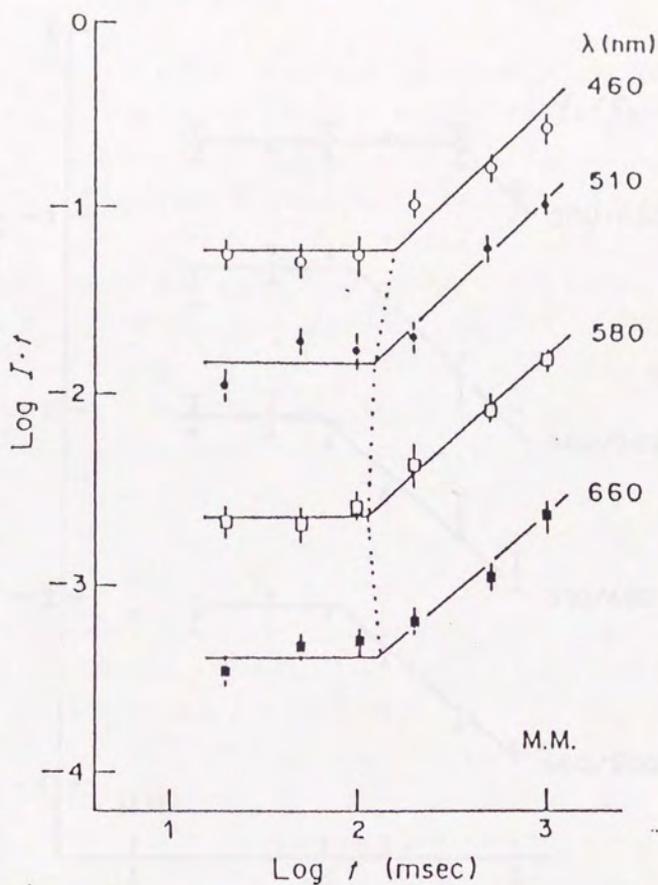


図3.2.2  $\text{Log } t$ - $\text{log } I \cdot t$  曲線 (被験者MM)

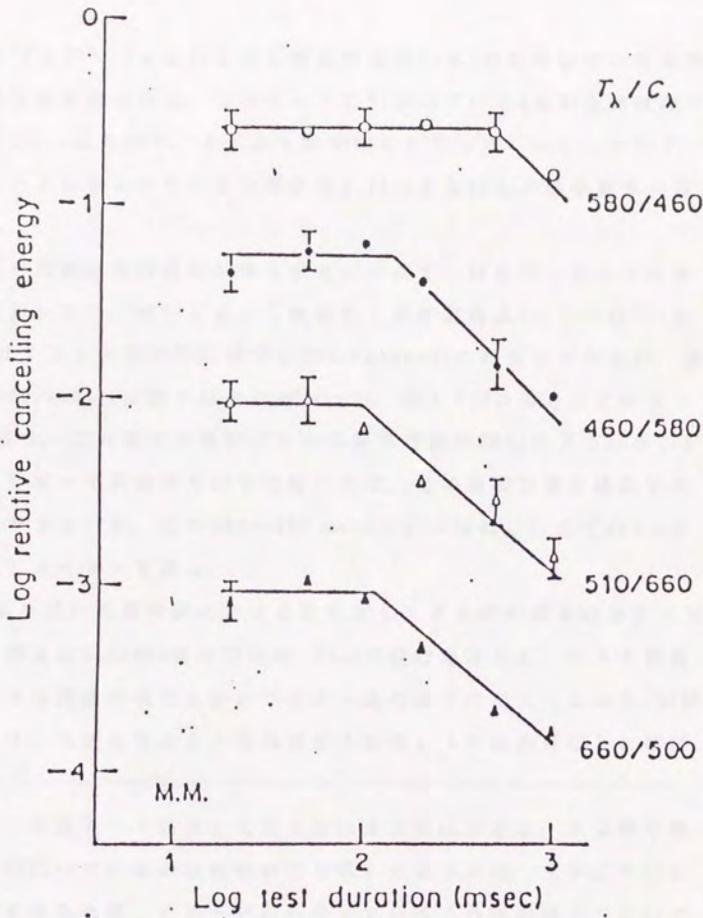


図3.2.3 等明るさ条件における色反応(被験者MM)

の波長( $T\lambda$ )で、 $T\lambda$ と打ち消し刺激の波長( $C\lambda$ )の組合わせは各曲線の末尾に記されている。又各データに引かれている2本の直線は傾き0(水平)と-1の直線で、そのあてはめは目で行った。いくつかのデータポイントに付された小さな縦棒は0.1log単位以上の標準偏差の値である。

テスト刺激の持続時間が増大するにつれて、打ち消し光のエネルギーは最初一定で、やがて減少し始めた。その屈曲点(ここでは $t_r$ と呼ぶ)はテスト刺激の持続時間が100~200msecの時生じているが、最上位(580/460)の曲線ではやや長かった。図3.2.3に示されている $t_r$ の値は、これまでの実験に於ける臨界持続時間 $t_c$ のようにコンピュータを用いて求めたものではないので、その厳密な値を算出することはできないが、この100~200 msecという値はこれまでの $t_c$ とほぼ同じオーダーである。

$t_r$ より長い持続時間における打ち消しエネルギーの減少はかなり大きく、例えば510/660条件では約1log単位にも及んだ。テスト刺激の明るさは持続時間にかわりなく一定のはずだから、この $t_r$ 以降の減少は、刺激の明るさとは独立な「色味」(又は色反応)と結び

---

3.2.2) (次頁) 「色味」と言う語は多少曖昧である。本実験で被験者が行っているのは色相の打ち消しであるから、文字どおりに解釈するならば、テスト刺激の持っている「色相の強さ」ということになる。しかし同じ波長(色相)を問題とする限り、それは結局テスト刺激の「飽和度」に対応する。又色メカニズムの反応という観点からすれば、「色味」=「飽和度」=「色反応の強さ」と考えることができる。

付いていると考えることができる<sup>3.2.2)</sup>。

一方<等輝度条件>の結果は図3.2.4に示されている。図中4本の直線は傾き-1の直線である。各データ群の後半の部分(直線が引かれている部分)は上の<等明るさ条件>の結果と似ている。それに対して、各データ群の前半の部分は大きく異なっている。上の<等明るさ条件>では打ち消しエネルギーはほぼ一定であったのに対し、ここでは持続時間が長くなるにつれて打ち消しエネルギーも増大した。又この条件でも屈曲点 $t_r$ (打ち消しエネルギーの最大値)はやはりテスト刺激が100~200msecの持続時間の時に生じた。しかし<等輝度条件>のこの部分は、持続時間が長くなるにつれて主観的明るさも増大する時間領域である。従って打ち消し光のエネルギーの変化がテスト刺激の主観的明るさの変化とパラレルになっている点では<等明るさ条件>の結果と同じである。

図3.2.5と図3.2.6は<等明るさ条件>の被験者MJMの結果である。直線のあてはめはなされていないが、100~200msecのテスト持続時間では打ち消しエネルギーがほぼ一定であり、それ以後減少し始めるという傾向はMMと同じであった。

図3.2.7は<等輝度条件>のテスト波長( $T\lambda$ )が510 nmで、打ち消し波長( $C\lambda$ )を600~680nmに渡って変えた時の結果である。又図3.2.8はテスト刺激の輝度を1.0log単位(10倍)引き上げた時の結果である。両図とも各曲線の位置はずらされていない。図からわかるように、曲線の形自体は全ての打ち消し波長条件で変わらなかった。しかしその縦軸(打ち消しエネルギー)の絶対値は明らかに打ち消し波長に依存し、 $C\lambda=680$  nmの時最大であり、 $C\lambda=600$ 又は620 nmの時最小となった。これはテスト刺激の持つ「緑味」を打ち消すのに、

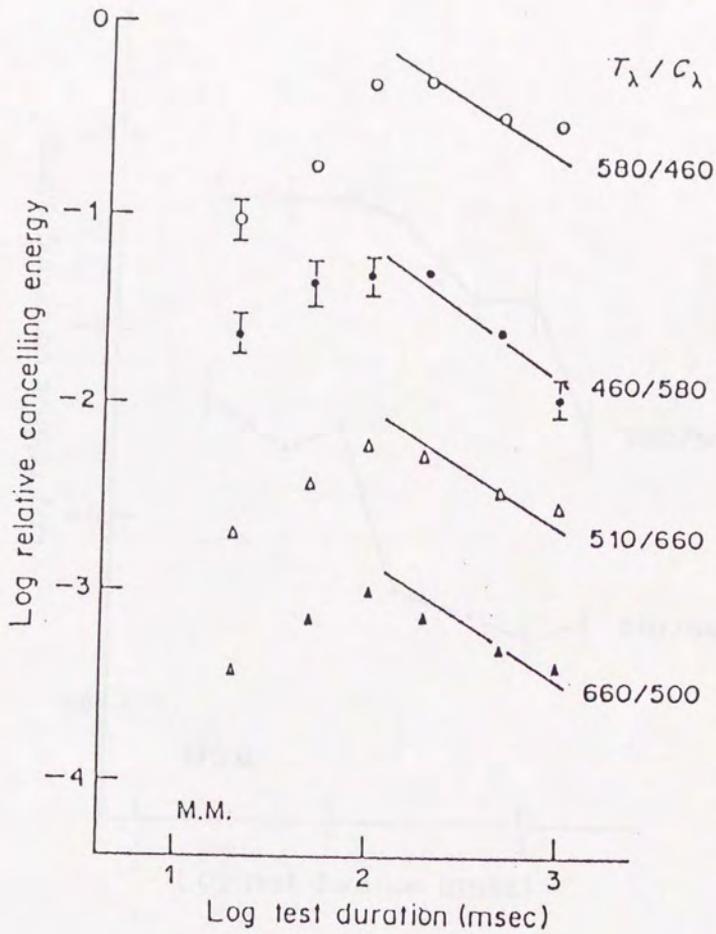


図3.2.4 等輝度条件における色反応 (被験者MM)

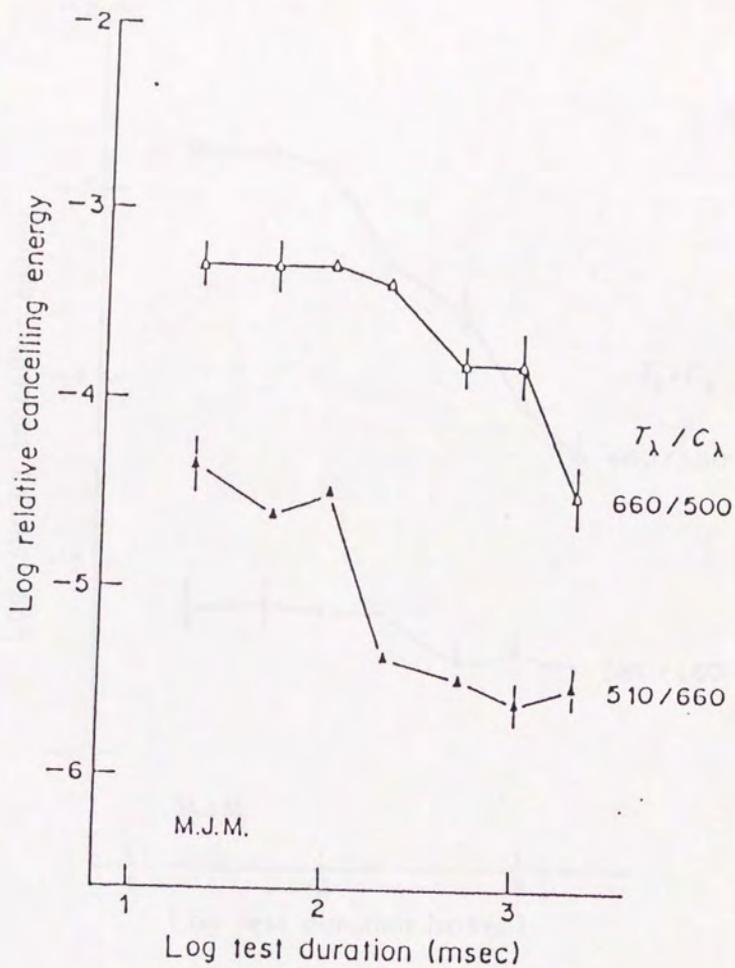


図3.2.5 等明るさ条件における色反応 (被験者MJM)

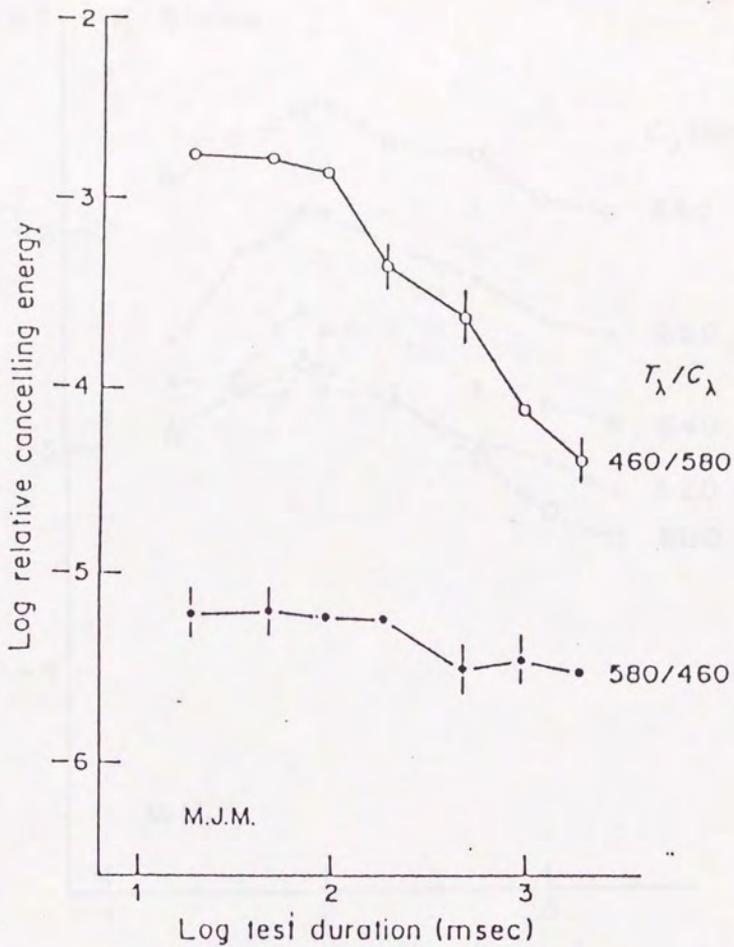


図3.2.6 等明るさ条件における色反応 (被験者MJM)

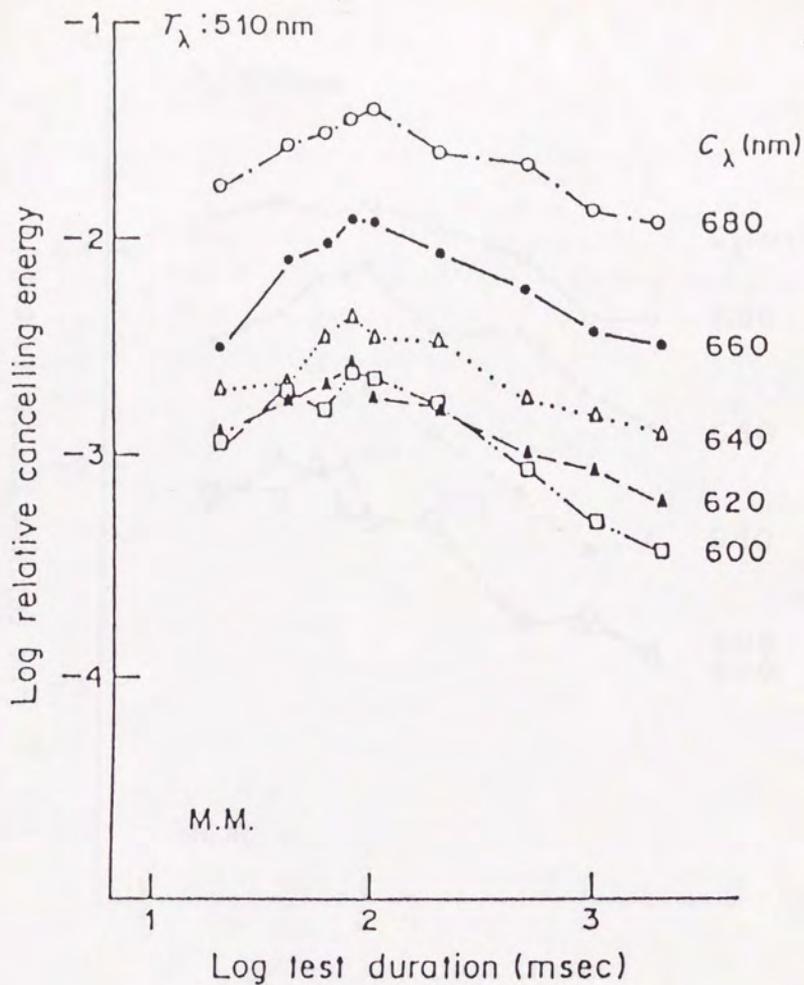


図3.2.7 さまざまな打ち消し波長による色反応( $\tau_\lambda : 510 \text{ nm}$ )

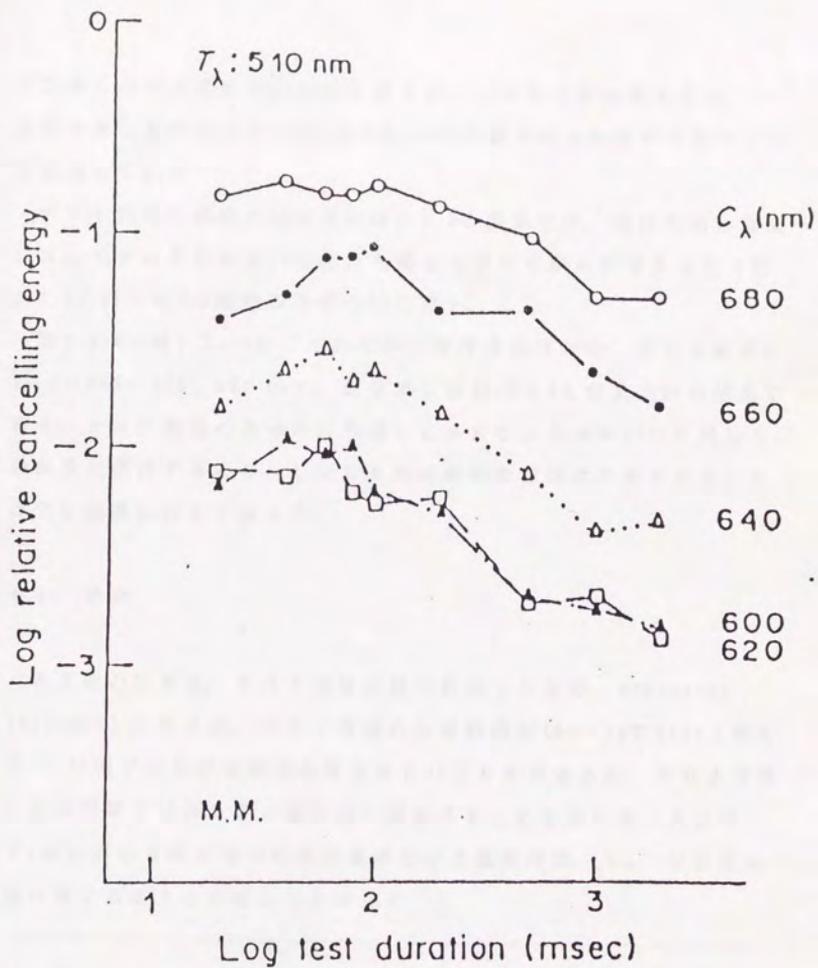


図3.2.8 さまざまな打ち消し波長 による色反応( $T_{\lambda} : 510 \text{ nm}$   
ただし強度は図3.2.7の10倍であることに注意)

打ち消し光の波長が680 nmの時最も強いエネルギーが必要であり、一方打ち消し光の波長が600又は620 nmの時最小のエネルギーで済むことを意味している<sup>3.2.3)</sup>。

テスト刺激の輝度が10倍高い図3.2.8の結果では、各打ち消し波長に対してそれぞれほぼ10倍の打ち消しエネルギーが必要であった(図3.2.7と図3.2.8の縦軸の目盛りに注意)。

図3.2.9～図3.2.11は、それぞれ<等輝度条件>の、テスト波長( $T\lambda$ )が660, 580, 460 nmで、打ち消し波長( $C\lambda$ )を変えた時の結果である。テスト刺激の色相の打ち消しに必要なエネルギーが打ち消し光の波長に依存すること、しかしその曲線の形自体は不変であることは上の結果と同じであった。

#### § 4. 考察

本実験の結果は、テスト刺激の持つ色味(色反応 chromatic response)の強さが、テスト刺激の持続時間が100～200 msec(即ち $t_r$ )以内ではその主観的な明るさとパラレルであるが、それより長い時間領域では明るさとは独立に減少することを示した。又この $t_r$ はいわゆる明るさの時間加重が生ずる臨界時間、 $t_c$ 、に非常に近い値であることが明らかとなった。

---

3.2.3)これを光量子数で考えると、例えば600nmと680nmの場合、光量子数に於けるその差： $\log(Q_{600} - Q_{680}) = \log(E_{600} - E_{680}) - 0.054$  ( $= \log(600/680)$ )となり、エネルギーレベルでの差( $\log(E_{600} - E_{680})$ )よりやや小さくなる。

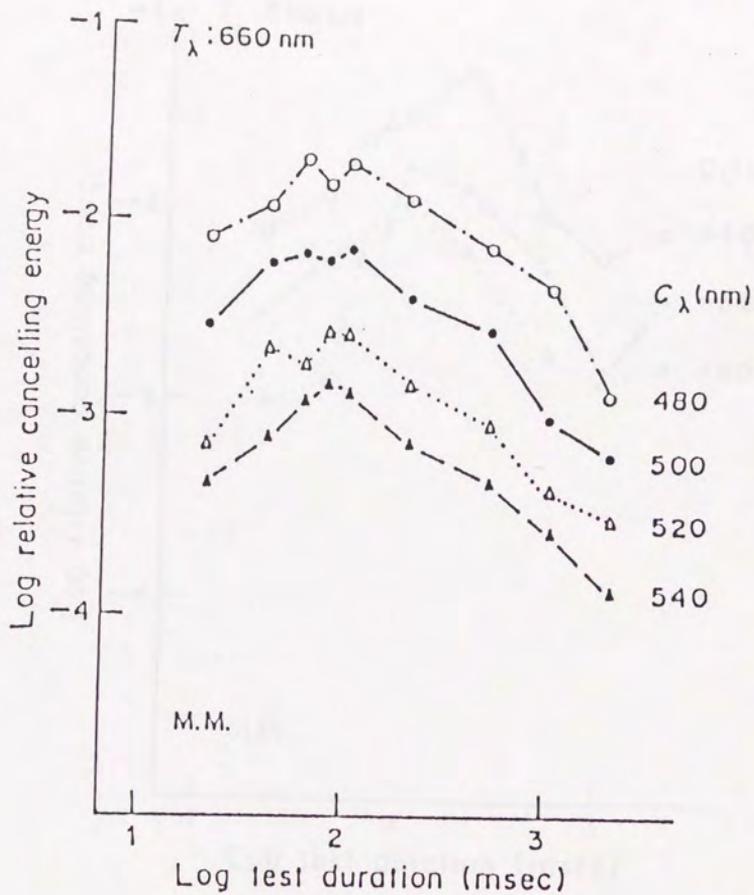


図3.2.9 さまざまな打ち消し波長による色反応( $T_{\lambda} : 660 \text{ nm}$ )

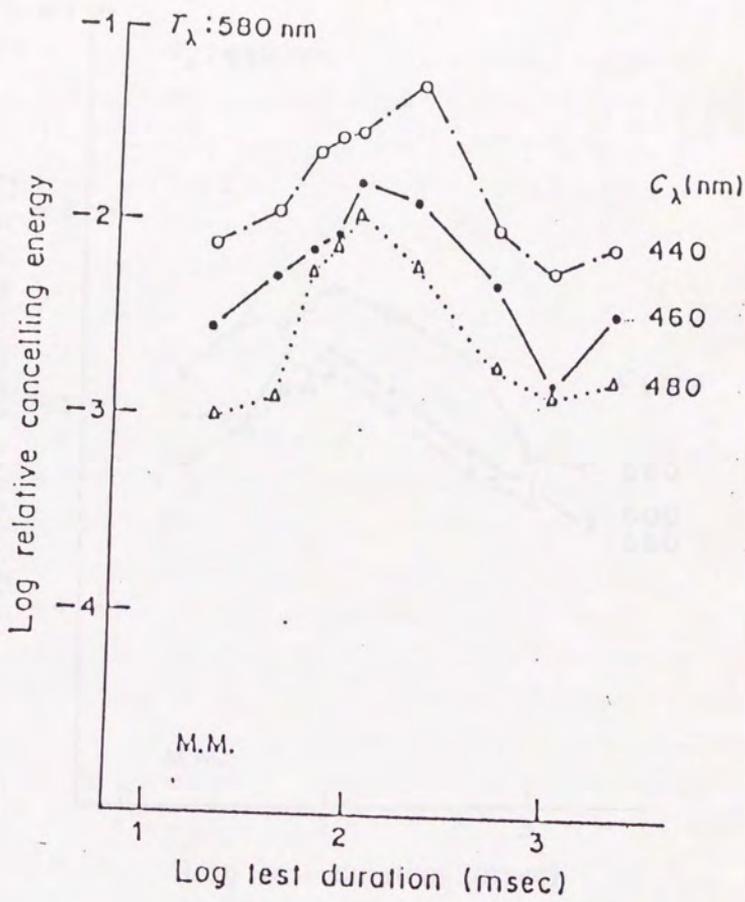


図3.2.10 さまざまな打ち消し波長による色反応( $T_{\lambda} : 580 \text{ nm}$ )

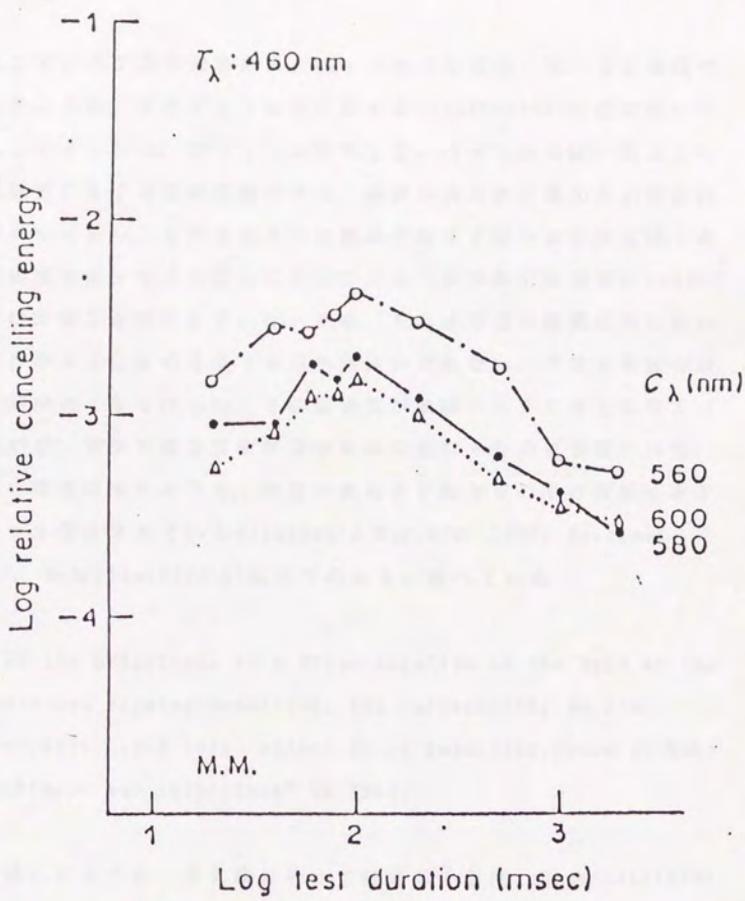


図3.2.11 さまざまな打ち消し波長による色反応( $T_{\lambda} : 460 \text{ nm}$ )

ここでいうテスト刺激の「色味」又は「色反応」は、上記脚注で述べたように、主にテスト刺激の飽和度(saturation)に結び付いていると考えられる。従って上の結果を言い代えるならば、明るさの時間加重が生ずる時間範囲内では、刺激の明るさと飽和度の変化はバラレルであり、それを越えると刺激の明るさは一定となるが、その飽和度は減少すると言うことができる。本実験では最長2 secまでの持続時間しか検討していないため、それより長い持続時間に於いてはどのような変化を生ずるのかは定かではない。テスト刺激の持続時間が長くなるにつれてその飽和度が無限に低下するとは考えにくいので、やがては定常条件の時の値に近づくものと予想される。

短い持続時間における、刺激の明るさと飽和度の平行関係は過去いくつか報告されている(Jameson & Hurvich, 1962; Hasegawa, 1982)。特にKinney(1965)は以下のように述べている。

" If the brightness at a given duration is the same as for an extended viewing condition, the chromaticity is also. Conversely, if a loss occurs it is generally found in both brightness and saturation" (p.739).

上述したように、本実験に於いては刺激の色度(chromaticity)の変化については直接知ることにはできない。しかし上の<等明るさ条件>の結果に見られたように、 $t_1$ より短い時間領域に於いて、打ち消し光のエネルギーが、用いられたどのテスト波長に対しても一定であったことはテスト刺激の色度に変化していないことを強く示唆している。

Hasegawa(1982)は両眼マッチング法を用いて短時間提示の刺激の明るさと飽和度の関係について検討した。それによると5msecから1secの間のいずれの持続時間に於いてもその飽和度は定常提示の時より低かったが、持続時間が100~300msecの時ピークが見られた。一方刺激の明るさの方はいずれの持続時間に於いても定常提示の時より高かったが、やはり100~300 msecの時ピークが見られた。定常条件に対する高低の差はあるが、ここでも持続時間の短い領域に於いては刺激の明るさと飽和度とは同じ時間特性に従うことが見られる。

Hasegawa(1982)の刺激の明るさに関する結果はいわゆるBroca-Sulzer効果と呼ばれる現象である。しかし本実験の結果は、打ち消しエネルギーの変化はテスト刺激の明るさと、少なくとも $t_i$ より長い時間領域において、パラレルではないと言う点でBroca-Sulzer効果の直接の反映ではない。

本実験の結果がKinney(1965)の結果と大きく異なる点は、刺激がある臨界持続時間( $t_i$ )を越えると明るさと飽和度の平行関係が崩壊するという点である。この平行関係が崩壊する臨界時間( $t_i$ )が明るさの加重が生じる臨界時間( $t_c$ )に近似している点は非常に示唆的である。

本実験の結果に対する最も単純な解釈は、打ち消し光のエネルギーによって示される視覚系の色反応に2種類あり、1つは視覚系の明るさ反応に依存し、もう1つは明るさ反応に依存しない反応であると仮定することである。又その時間的な関係から、前者は視覚系のより早い段階で生じ、一方後者はより後の段階で生じると仮定される。換言すれば、 $t_i$ より短い時間領域に於いては、刺激の明るさと飽和度とは同一のシステムによって伝達され、一方 $t_i$ 以後は異なったシ

システムによって伝達されていると考えられる。

このような刺激の色情報と明るさの情報を同時に伝達する過程の第1の候補は第1サイト（錐体）であろう。この第1サイトは又単一変数の原理に従う加算的な過程であるから、その反応の強さは吸収した光量子数に比例しなければならない。図3.2.8に示されているように、刺激の輝度を10倍に上げると、その反応の強さ（打ち消しに必要なJ入のエネルギー）もほぼ10倍となる結果はこれを強く示唆している。

一方 $t_1$ 以後の時間領域に於いては、テスト刺激の明るさが一定であるのに対して、テスト刺激の飽和度は減少した。これは、視覚系の色反応が明るさ反応とは独立であることを示している。こうした過程は錐体又は第1サイトで生じているとは考えにくい。むしろそれ以後の反対色システム又は第2サイトの反応であると考えられる。つまり $t_1$ より長い持続時間に於ける打ち消しエネルギーの減少は反対色システム又は第2サイトの反応の減少を表していると考えられる。もしこれを反対色システムの順応と考えることができるなら、それは刺激提示後早くも100~200 msecから生ずることになる。

さてこの $t_1$ は閾値に於ける時間加重の臨界持続時間 $t_c$ に近い値であった。厳密に $t_1 = t_c$ であるかどうかは、本実験の結果からは定かではない。例えば閾値の時間加重では青色光に対する $t_1$ が最も長かったし、（閾上の）明るさの時間加重でもその傾向は同じであった（図3.2.2）。一方打ち消しのデータに於いてはむしろ黄色光を青色光で打ち消す条件（580/460 nm）で $t_1$ が長くなる傾向を示した。従って関係がある意味で逆であると考えられる。しかし、図3.2.3の<等明るさ>条件の結果に示されているように、打ち消し光のエネル

ギ-持続時間のグラフは傾き0(水平直線)と-1.0の2本の直線で近似でき、又この条件のテスト刺激はその持続時間に拘らず、等しい明るさとなるように強度が調節されていることを考えると、十分に可能性のあることである。もしそうであるなら、閾値(及び明るさ)の時間加重の限界である $t_c$ はまた反対色システムの順応が始まる時間でもある。換言すれば、もし $t_r = t_c$ であれば、閾値に於ける時間加重は錐体内で生起し、反対色システムの順応がそれを終了させることを意味しよう。

## § 5 要約

(1)さまざまな波長のテスト刺激の色味を、短い一定の持続時間の反対色によって打ち消すという方法(transient hue cancellation法)を用いて、その色味の打ち消しに必要な反対色光(打ち消し光)のエネルギーを、テスト刺激の持続時間の関数として求めた。

(2)テスト刺激の主観的明るさがその持続時間によって変化しない<等明るさ条件>では、ある一定の持続時間( $t_r$ :ほぼ200msec)にいたるまでは打ち消し光のエネルギーは一定であり、その後は減少した。一方テスト刺激の輝度が一定(従ってその主観的明るさは持続時間と共に変わる)である<等輝度条件>では、テスト刺激の持続時間が増大するにつれて打ち消しエネルギーも増大するが、やはり<等明るさ条件>と同様に、 $t_r$ を境にして減少した。

(3)刺激の色相が同じである限り、この打ち消しに必要なエネルギーはテスト刺激が持っている飽和度と結び付いていると考えられる。

又それは視覚系のある過程の色反応の強さを示していると考えられる。

(4)以上の結果は、その反応の大きさが刺激の主観的な明るさに依存する色反応と依存しない色反応とがあり、前者は後者に比べ視覚系のより早い段階の過程から生じると仮定すると説明することができる。

(5)前者の過程は錐体又は第1サイト、一方後者は反対色システム又は第2サイトと仮定され、 $t_1$ 以後の打ち消しエネルギーの減少は反対色システムの反応の減少を示すと解釈された。

(6) $t_1$ は閾値に於ける時間加重の臨界持続時間 $t_c$ の値と近似していた。もし $t_1 = t_c$ と考えることができるならば、本実験の結果は、視覚系の時間加重は反対色システム(第2サイト)の順応の開始と共に終了するという可能性が示唆された。

### 第3節 実験6 刺激の持続時間の関数としての飽和度の変化

#### § 1. 目的

実験6は実験5の結果を確かめるために行った。前の実験ではテスト刺激の持続時間が $t_1$ を越えると、刺激の明るさは一定であるにも拘らず、打ち消し光のエネルギーは減少した。この結果はテスト刺激の持つ飽和度が減少したためであると解釈した。しかしここでは被験者にテスト刺激が実際にその飽和度を減じたかどうか報告を求めてはなかった。打ち消しの基準はどこまでもテスト刺激の色相が消失したか否かであった。本実験は、実験5に於いてテスト刺激の $t_1$ 以後に見られる打ち消しエネルギーの減少が実際にテスト刺激の飽和度の減少を示しているのかどうかを、異なった方法によって、検証することが目的である。具体的にはパーソナルコンピュータによって制御されたカラーディスプレイ上にさまざまな持続時間を持った刺激（テスト刺激）と一定の持続時間の比較刺激を継時的に提示し、被験者にどちらの刺激がより飽和度が高いかの判断を強制選択法によって求めた。

#### § 2 方法

##### 2. 1 装置と刺激

全ての刺激はパーソナルコンピュータ（NEC PC-9801 F2）を用いて高解像度（640ドット×400本）カラーディスプレイ（NEC PC-

8853 n) に提示した。刺激には赤、緑、青、及び黄色の4色を用いた。色彩輝度計 (Photo Research 社 Prichard Model 1980 A-PL) によって測定した刺激の色度図上の主波長及び輝度はそれぞれ (620 nm, 80 cd/m<sup>2</sup>), (551 nm, 192 cd/m<sup>2</sup>), (466 nm, 44 cd/m<sup>2</sup>), (576 nm, 208 cd/m<sup>2</sup>) であった。

同形同大 (40' × 40' の正方形) のテスト刺激 (TS) と比較刺激 (CS) とをディスプレイ画面の同一位置 (中央) に継時的に提示した (図 3.3.1)。図 3.3.2 は刺激の時間関係を示す。CS の持続時間は一定 (214 msec) で、一方 TS の持続時間は 36.4 msec ~ 2.25 sec まで 9 段階に変化させた<sup>3, 3, 11</sup>。CS と TS の ISI (Inter-stimulus Interval) は 214 msec とした。刺激の順序効果を避けるために、TS の各持続時間条件に於いて、半分は図 3.3.2 のように CS-TS の順に提示し、残りの半分は逆に TS-CS の順に提示した。いずれの場合にも、先ず画面中央に赤色の注視点が 1 sec 間提示され、その 1 sec 後に刺激が提示された。

被験者は CS と TS のどちらが「より飽和しているか (飽和度が高いか)」の判断を、TS の各持続時間条件で計 10 回求められた (そのう

---

3.3.1) この場合刺激が実際にその持続時間の間ディスプレイ画面上に存在しているわけではない。色彩輝度計とシンクロスコープ (前述) による測定では、ディスプレイの画素 (pixel) の発光持続時間は 1 msec で、立ち上がり及び立ち下がり時間は共に 1 msec であった。しかし走査周波数が 56.4 Hz (17.7 msec/scanning) であるため、通常の条件では観察者は時間的に分解できず、現象的には定常光として知覚される。

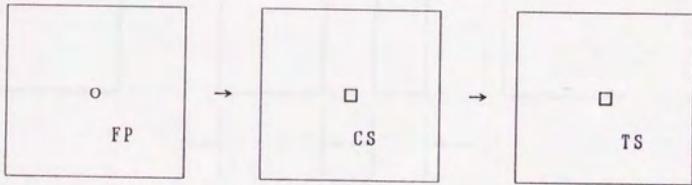


図 3.3.1 被験者から見た刺激パターン

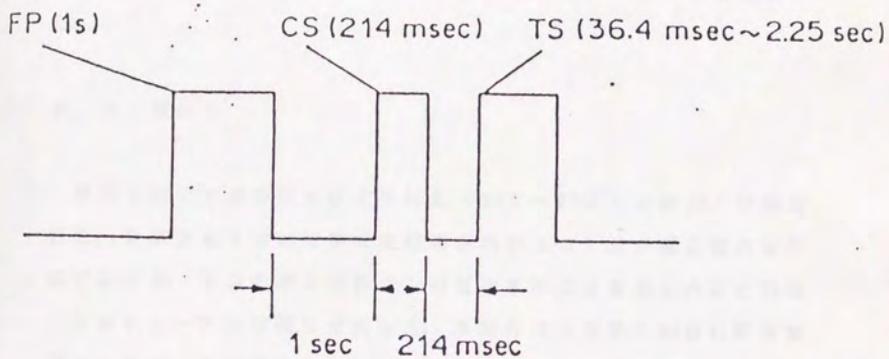


図3.3.2 刺激の時間関係 10試行のうち5試行は図に示されているようなCS-TSの順序で提示され、残りの5試行は逆のTS-CSの順序で提示された。

ち5回はCS-TSの順、残りの5回はTS-CSの順)<sup>3・3・2)</sup>、反応はそれぞれテスト刺激または比較刺激と対応づけられたコンピュータのキーを押すことによってなされ、それぞれ自動的にデータとして読み込まれた。セッションを開始するのに先立ち、被験者は薄暗い部屋に約10分間順応した。刺激は両眼視で観察し、頭部はあご台で固定した。

## 2. 3 被験者

著者(HM)と大学生及び大学院生(20才~28才)の計10人が参加した。全員色覚(主に石原式仮性同色表による)及び矯正視力は正常であった。著者を除き全員、この種の実験には参加したことの殆どないナイーブな被験者であった。本試行に入る前に20回の練習試行をしたが、その際結果についてのフィードバックあるいは示唆は一切与えなかった。

---

3.3.2)飽和度は「感覚的にどの程度灰色から離れているか」を示す心理学的概念である。実際の教示には「彩度」、「鮮やかさ」あるいは「色の濃さ」という言葉によって説明を行った。色に関して十分な観察経験を持たないナイーブな被験者にとって、刺激の「飽和度」を他の属性から独立して判断することはかなり難しい課題である。特に刺激の「明るさ」の変化と混同を起こし易い。そこで本実験ではできる限り刺激の「明るさ」の変化と混同しないように教示された。又飽和度の概念を説明するために、「どちらの刺激がより白っぽくないか」という教示も補助的になされた。

### § 3 結果と考察

図3.3.3は被験者10人の結果の平均である。テスト刺激の持続時間(対数)に対して、「TSがCSより飽和して見えた割合(%)」がプロットされている。図中横線は50%の割合を示す、又↓印は214 msecの持続時間を示す。この214 msecの持続時間はCSの持続時間でもあるので、理論的にはこの時TSとCSが飽和して見える割合は等しく(即ち50%)になるはずである。実際、図からもわかるようにほぼ50%付近の値となった。

各曲線はそれぞれ異なった色の結果を表している。テスト刺激の持続時間が短い範囲内に於いては、持続時間が増大するにつれてその飽和度も増大した。しかしある持続時間で極大に達した後、明らかに飽和度は減少した。これは実験5の<等輝度条件>の結果と軌を一にするものである。飽和度のピークを与える持続時間( $t_0$ とする)は、テスト刺激が赤色及び黄色の時約300 msec、一方青色及び緑色の時約150 msecであった(青色の場合は約200 msecの時も同じ値であった)。このように $t_0$ の値は実験5の $t_0$ 及び時間加重の臨界持続時間 $t_0$ とオーダー的には同一であった。ただ青色光の時の $t_0$ が特別に大きくないことや黄色光に対する $t_0$ が長い結果は、実験5の結果とは矛盾しないが、 $t_0$ とはやや異なっている。しかし本実験で用いられた刺激の持続時間条件はやや粗く、又刺激条件(輝度レベル等)も異なるため、各色光に対する $t_0$ の厳密な値を本実験の結果から決めることは困難である。従ってここでは用いられた赤、黄、緑、青の4色について、その持続時間が増大するにつれて初め飽和度が増大するが、100~300 msecあたり以上になると逆に低下した

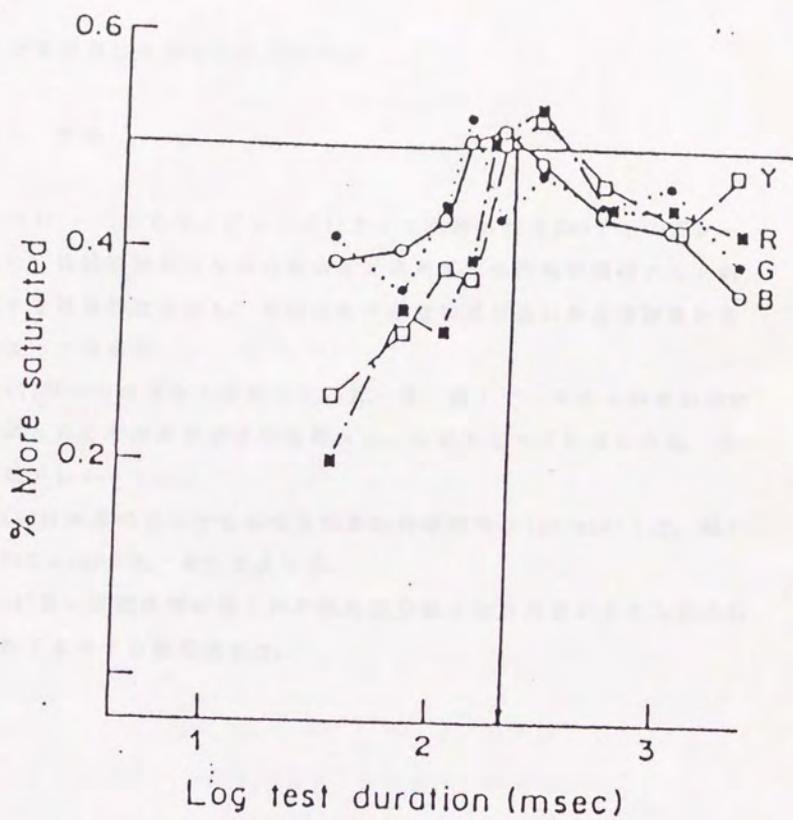


図3.3.3 テスト刺激の持続時間の関数としての飽和度の変化  
(10人の被験者の平均)

ことを指摘しておくにとどめたい。

#### § 4 要約

(1) パーソナルコンピュータによって制御されたCRTディスプレイ上に、持続時間が一定の比較刺激とさまざまな持続時間のテスト刺激とを継時的に提示し、そのどちらが飽和度が高いかを強制選択法によって求めた。

(2) 用いられた全ての色（赤，黄，緑，青）で、テスト刺激の持続時間と共にその飽和度は初め増大し、やがてピークに達した後、逆に低下した。

(3) 飽和度のピークを与える刺激の持続時間は150 msec（青，緑）～300 msec（赤，黄）であった。

(4) 長い持続時間に見られた飽和度の低下は反対色システムの反応の低下を示すと解釈された。

#### 第4節 実験7 閾値事態に見られる反対色システムの順応

- 変形 co-termination法を用いて -

##### § 1. 目的

これまでの実験に於いて、閾値を求める時その短い提示時間の間にテスト刺激の色が変化し、又明るさが減少することが観察された。色の変化については、実験5、6によって、色刺激提示後100~300 msecから刺激の飽和度が減少し始めることが明らかにされた。これは反対色システムにおける順応の始まりであると考えられた。この実験7では刺激の明るさの変化について検討することが目的である。

刺激の主観的な明るさがその持続時間に依存する現象もまた新しい現象ではない。本論文の主題である明るさの時間加重そのものがそうした現象の1つである(ただし「加重」である)。又いわゆる Broca-Sulzer効果(Broca & Sulzer, 1902)として知られる単一フラッシュ光に於ける明るさの増大(brightness enhancement)も良く知られている現象である。それによると、持続時間の短い刺激は同じ強度の定常光に較べ主観的に明るく感じられ、特に60~150 msec(条件による)の持続時間の時最も明るく感じられる。この場合も明るさの「増大enhancement」に力点が置かれるが、見方を変えれば、長い持続時間(その極端な場合が定常刺激である)に於いては主観的な明るさが(ピーク時に比べ)減少することを意味している。

さらに単一フラッシュ光ではなく連続光(フリッカー光)の場合にも、同じ強度の定常光に較べ、ある周波数(条件によるがほぼ2~

20 Hz) のフリッカー光は全体的に明るく感じられる (Bartley, 1961)。これは最初の報告者にちなみ、Brücke-Bartley効果と呼ばれている。

これらは全て閾上の現象を取り扱ったものである。しかし本研究では全て閾値を測度として用いているので、ここでも閾値測定によるアプローチを試みた。具体的にはさまざまな持続時間のフィールド刺激 (通常の実験に於けるテスト刺激にあたと仮定する) の上に、それと時間的に off-set が同期する、持続時間 (一定) の短い「テスト光」を提示し、その閾値を測定した。この方法は、両刺激の時間関係は実験 5 と同じであるが、本来の co-termination 法と異なり、両刺激が空間的に重なっている点及び刺激の明るさの評価ではなく閾値測定であることから変形 co-termination 法 (Higgins & Knoblauch, 1977) と呼ぶことができよう。

もし上に述べたような、刺激の明るさの変化 (減少) が閾値に反映するならば、改めて用いたテスト光の閾値は、ある経過時間までは増大し、その後低下することが予想される。前者はいわばフィールド刺激による加重 (フィールド加重) であり、一方後者はフィールド刺激 (のなんらかの効果) による感度の低下 (テスト閾という点では感度の増大あるいは促進) である。本実験ではいくつかの波長及び大きさの刺激を用いて検討し、特に時間的感度促進現象との関連性について考察を行った。

## § 2. 方法

### 2. 1 刺激

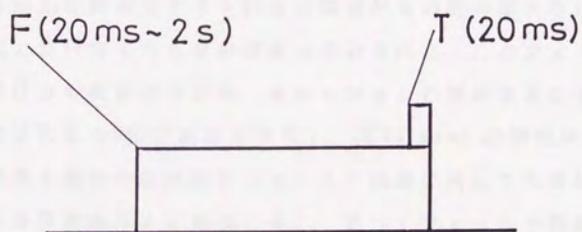
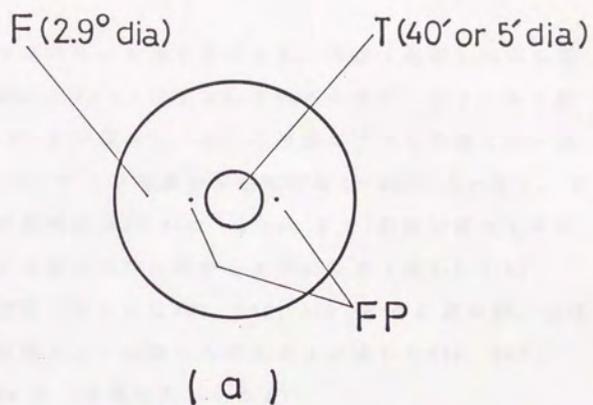


図3.4.1 本実験の刺激パターン(a)と  
刺激の時間関係(b)を示す模式図

刺激は全てマックスウェル視で提示され、単眼（右眼）の中心視で観察された。図3.4.1 (a)に示されているように、フィールド刺激 (F) は直径 $2.9^\circ$  の円板形で、その中央部にテスト刺激 (T:  $5'$ 又は $40'$ ) を提示した。テスト刺激の持続時間は20 msec (一定)、フィールド刺激の持続時間は20 msec~2 sec まで7段階に渡って変化するが、両刺激とも常に同時に終わるようにした (図3.4.1 b)。

テスト刺激の波長 ( $\lambda$ ) には460, 540, 640 nm の3波長が、又フィールド刺激の波長 ( $\mu$ ) にはそれぞれの $\lambda$ に対して450, 500, 550, 600, 650 nm の5波長が用いられた。

フィールド刺激の強度は、フィールド刺激の持続時間を20 msecに保ち、その上に於けるテスト刺激の閾値がその絶対閾より $1.0 \log$  単位 (10倍) だけ高くなる時の強度に決められた。このフィールド強度は $\lambda$ 及び $\mu$ の組合せごとに、各セッションの開始直前に求められた (調整法による6回の測定の前平均)。又20 msecの持続時間で求められた強度を他の持続時間のフィールド刺激に対しても適用し (前実験の<等輝度条件>に相当する)。従ってフィールド刺激は持続時間が長くなるにつれて、その主観的な明るさは増大した。

## 2. 2 手続き・被験者

増分閾の測定には調整法を用いた。テスト光 (大きさ:  $40'$ 又は $5'$ ) の各波長で、5種類のフィールド刺激の波長条件を検討し、これを1セッションとした。各波長のフィールド刺激は持続時間が20 msec~2 secの7段階に渡ってランダムに変化し、それぞれの持続時間に於いてテスト光の閾値を6回測定した。各セッションは後日2~

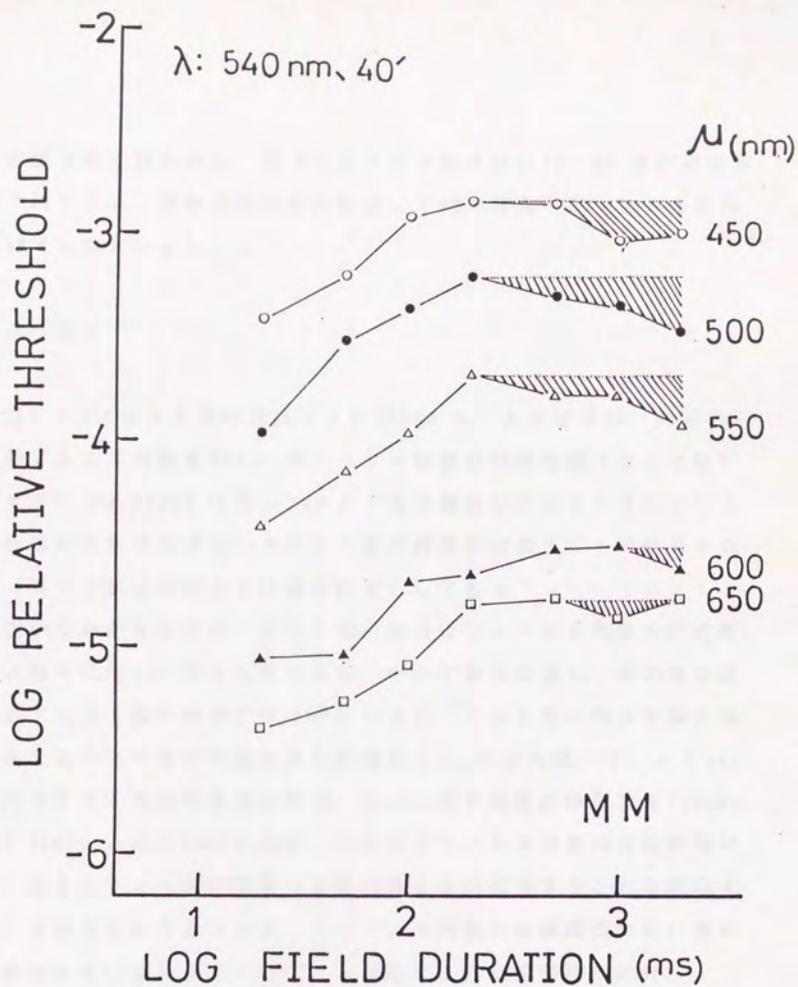


図3.4.2 Temporal sensitization (斜線で示されている領域)

$\lambda = 540\text{nm}, 40'$ .

4回繰り返されたので、以下に示される結果は計12~24回の測定値の平均である。被験者は全条件に渡ってMM(著者)が、又一部条件でYK(前出)が参加した。

### § 3. 結果

図3.4.2はテスト光の波長( $\lambda$ )が540 nm, 大きさが40'の時の結果である(被験者MM)。フィールド刺激の持続時間(ここでは $t'$ とする: log msec)に対してテスト光の閾値がプロットされている。各曲線はそれぞれ異なったフィールド刺激の波長( $\mu$ )の結果を表し、見やすいように上下に適当にずらしてある。

図からわかるように、テスト光の閾値はフィールド刺激の持続時間の増大に伴い、初め上昇するが、やがて極大に達し、その後は逆に低下した(図中斜線で示されている)。テスト光の閾値の極大値を与えるフィールド刺激の持続時間を $t_{max}$ とすれば、 $t' < t_{max}$ の時のテスト光の閾値の上昇は、フィールド刺激の時間加重(temporal field summation)を示す。これはフィールド刺激の持続時間が長くなるとフィールド刺激の主観的明るさが増大することを意味する。又感度という点からは、フィールド刺激の持続時間に伴い感度は減少することを示している。ちなみにこの刺激条件に於ける $t_{max}$ は約200 msecであった。

ここでテスト刺激による時間加重にならって、

$$I(t) = t' \cdot c \quad (t' < t(f).)$$

( $I(t)$ : テスト刺激の閾値強度,  $t'$ : フィールド刺激の持続時間,

c: 定数)

を満たすフィールド刺激による時間加重の臨界持続時間 ( $t(f)_c$ ) を、便宜的に各曲線の極大値を通る水平線と左端の点を通る傾き 1 の直線との交点を与えるフィールド刺激の持続時間によって定義すると、 $t(f)_c$  は 72.4 msec となった。

一方  $t > t_{max}$  の時のテスト光の閾値の低下は、フィールド刺激による明るさ反応の低下に対応し、逆に感度は上昇していることを意味している (感度促進)。

長い持続時間のフィールド刺激に於ける感度の上昇 (閾値の低下) は、丁度フィールド刺激の面積の増大と共にテスト光の閾値が低下する現象が空間的感度促進現象 (spatial sensitization) と呼ばれているのに対し、時間的感度促進現象 (temporal sensitization) と呼ぶことができる。この sensitization の大きさ (テスト光の閾値の低下量) は明らかにフィールド刺激の波長 ( $\mu$ ) に依存した。この条件では  $\mu = 500$  nm の時最大で、約 0.27 log 単位の低下を示した。概して短・中波長で大きく、長波長領域で小さかった。特に  $\mu = 600$  nm (橙色) の時非常に小さく、2 sec の持続時間の時僅かに低下が見られるに過ぎなかった。

図 3.4.3 は同じテスト波長 (540 nm) で、大きさが 5' の時の結果である。基本的には上の 40' の結果と同じ特徴が見られた。この条件では  $\mu = 600$  nm の時には用いられた最長の持続時間 (2 sec) でも sensitization は全く生じなかった。

図 3.4.4 と図 3.4.5 はテスト波長が 460 nm で、大きさがそれぞれ 40' と 5' の時の結果である。又図 3.4.6 と図 3.4.7 はテスト波長が

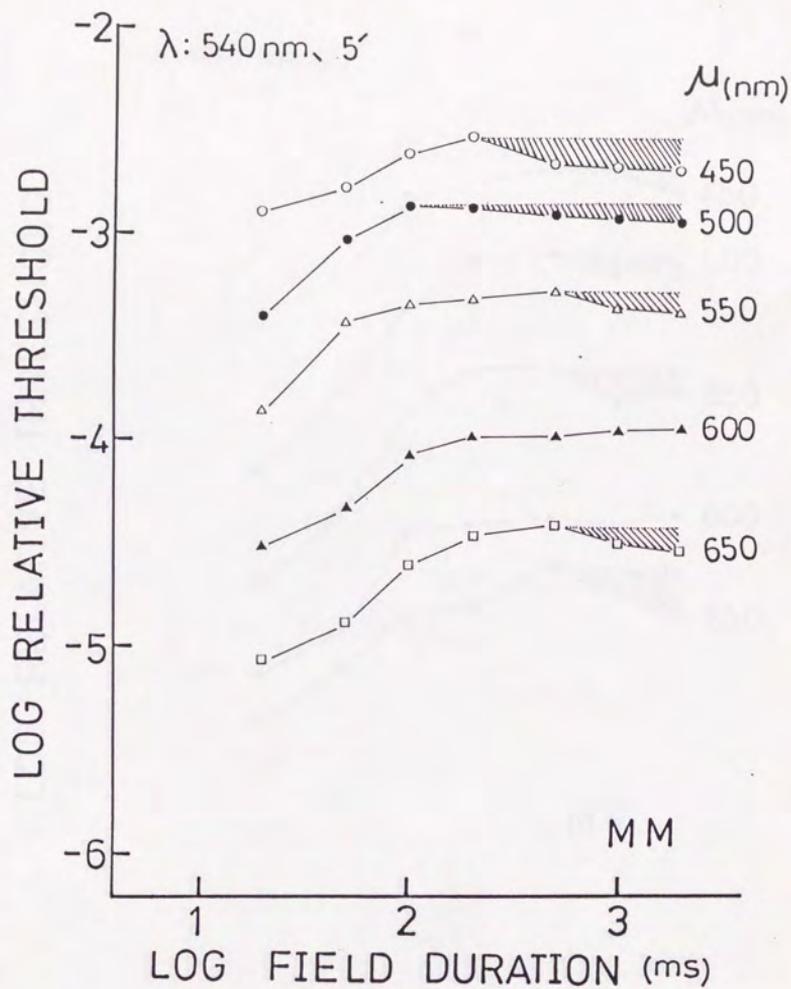


圖 3.4.3 Temporal sensitization

$\lambda = 540\text{nm}, 5'$ .

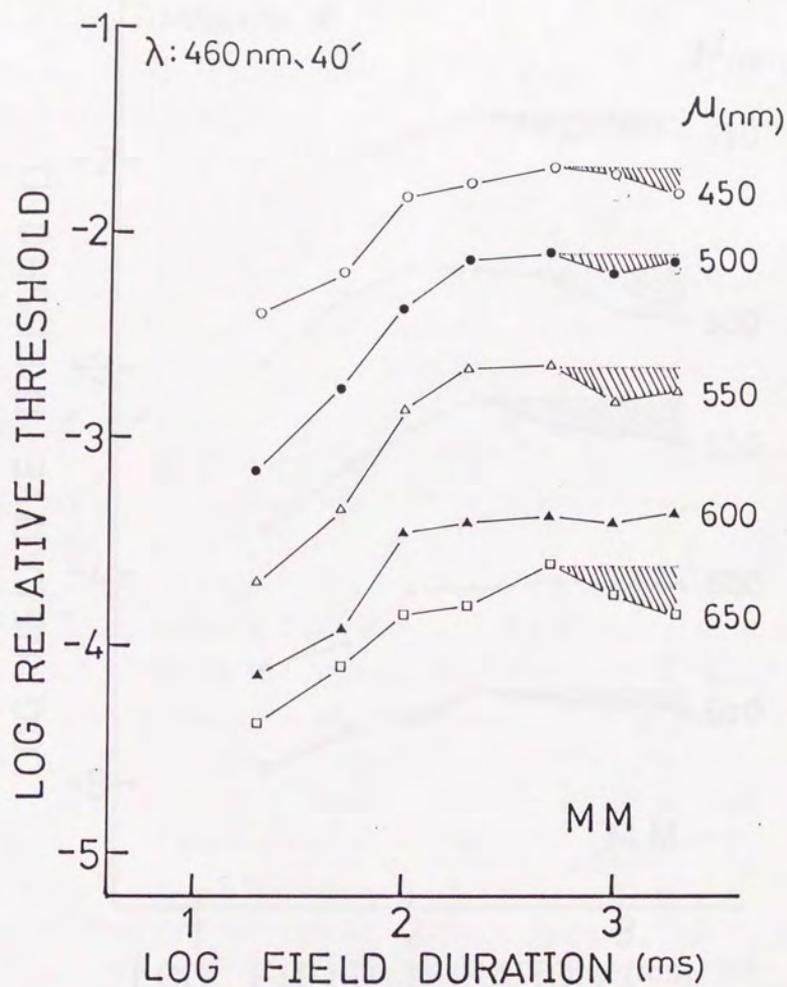


图 3.4.4 Temporal sensitization

$\lambda = 460\text{nm}, 40'$ .

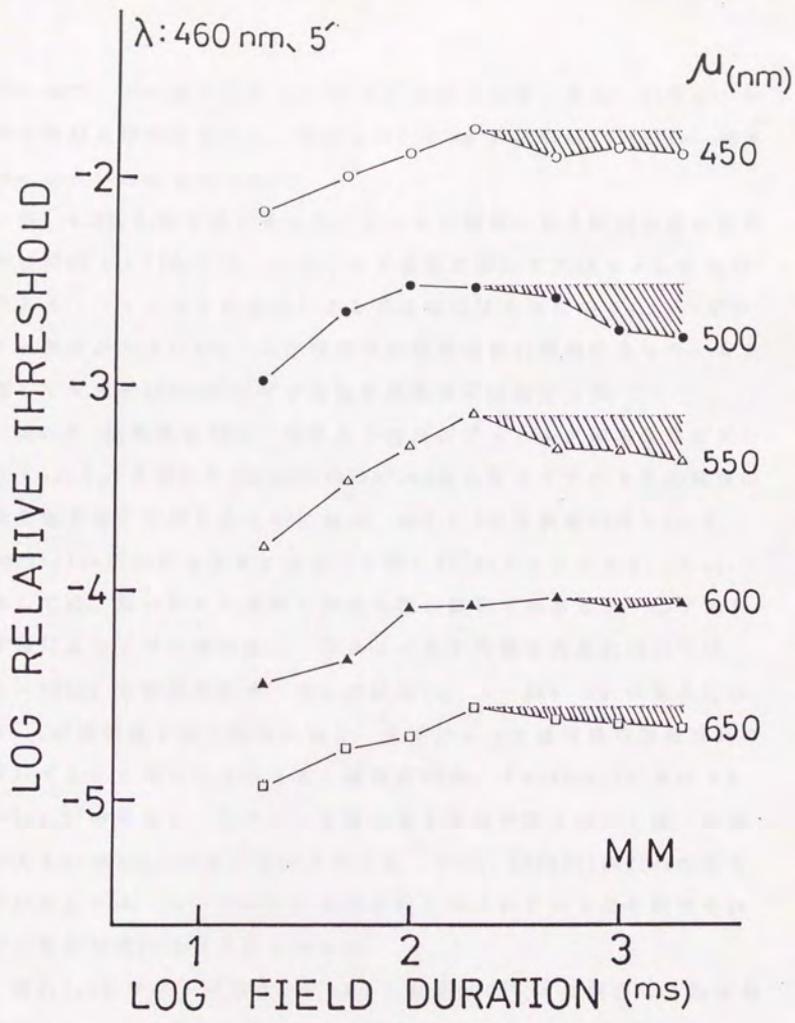


图 3.4.5 Temporal sensitization

$\lambda = 460 \text{ nm}, 5'$ .

640 nmで、大きさがそれぞれ40'と5'の時の結果である。いずれの条件でも似た傾向が見られ、特に $\mu = 600$  nmの時sensitizationが非常に小さい結果となった。

図3.4.8は上の方法で求めたフィールド刺激による時間加重の臨界持続時間( $t(f)$ )を、フィールド波長に対してプロットしたものである。フィールドの波長による差は殆ど見られなかった。一方テスト刺激が大きい(40')ほど臨界持続時間は長い傾向にあった。また概して青色光(460nm)に対する臨界持続時間は長かった。

表3.4.1は被験者MMの、各テスト光及びフィールド刺激条件に於ける $t_{max}$ を、又表3.4.2はsensitizationの大きさ(テスト光の閾値の最大低下量)を示したものである。表3.4.3は被験者YKの $t_{max}$ とsensitizationの大きさである(ただし40'のデータのみ)。 $t_{max}$ に関しては、用いられた条件上かなり粗い数字ではあるが、①テスト波長によって余り差はない、②フィールド刺激の波長については、 $\mu = 600$ nmの場合を除き、余り差はない。 $\mu = 600$  nmの場合には $t_{max}$ が特に長くなる傾向にあり、条件によっては最長の持続時間においても全く見られなかった(被験者MMの、 $\lambda = 460$ nm, 40'及び $\lambda = 540$ nm, 5'の場合)。③テスト刺激の大きさの要因については、刺激が大きい程 $t_{max}$ は長くなる傾向にあったが、sensitizationの大きさに対しては、 $\mu = 600$ nmの場合に特に小さいという点を除きそれほど明かな傾向は見られなかった。

図3.4.9はテスト波長を540 nm(大きさは40')に固定し、各波長のフィールド刺激の強度を変えた時のテスト光の閾値の変化を、フィールド刺激の持続時間が200 msecと2 secの場合とで比較した、一種のt.v.i.曲線である。200 msecはテスト光の閾値が概して極大と

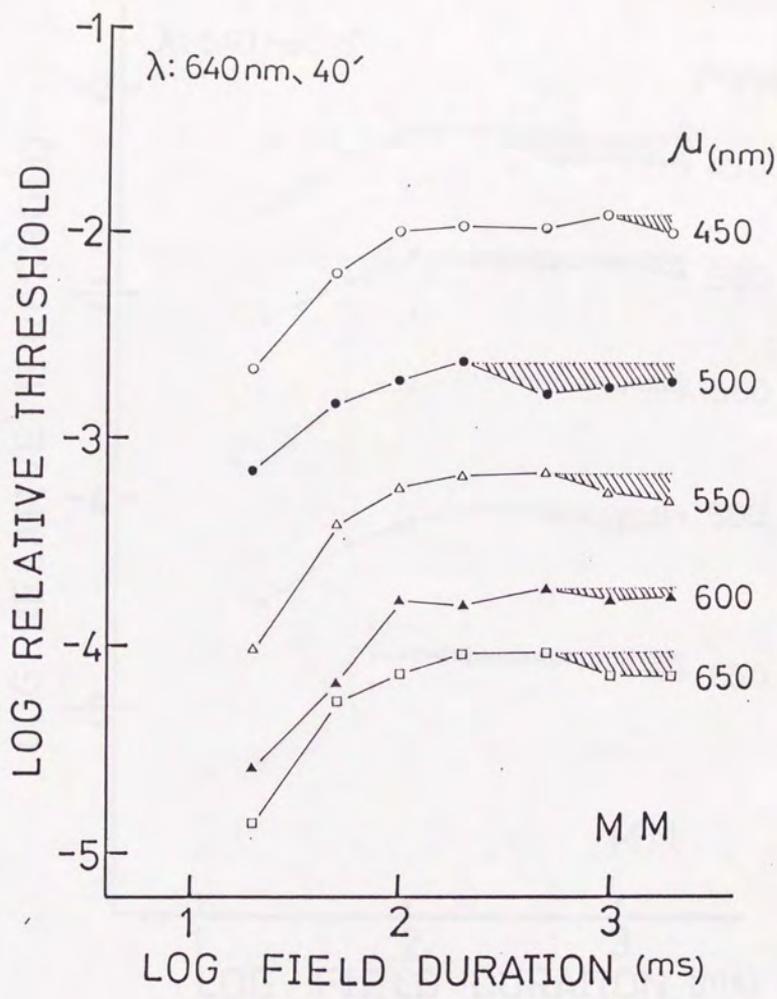


图 3.4.6 Temporal sensitization

$\lambda = 640\text{nm}, 40'$ .

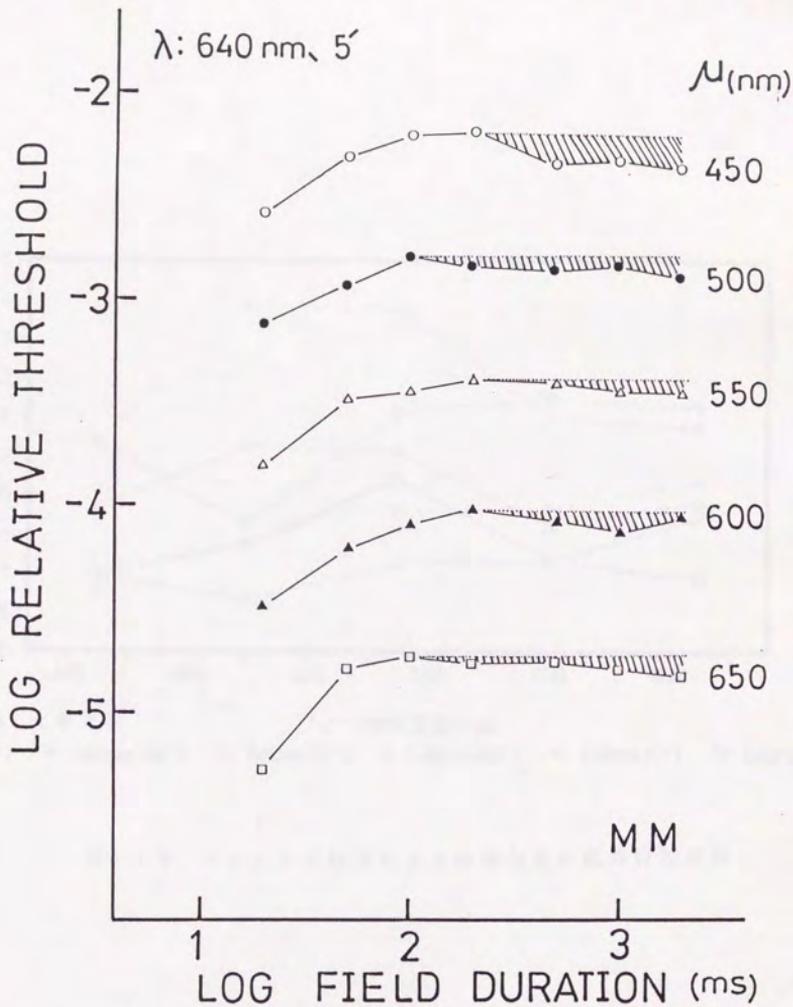
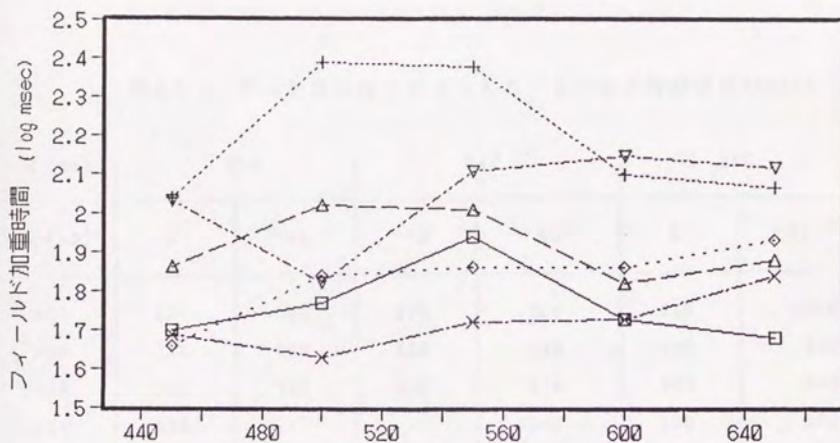


图 3.4.7 Temporal sensitization

$\lambda = 640 \text{ nm}, 5'$ .



テスト波長(大きさ):

フィールド波長(nm)

□ 460nm(5') + 460nm(40') ◇ 540nm(5') △ 540nm(40') × 640nm(5') ▽ 640nm(40')

図3.4.8 フィールド刺激による時間加重の臨界持続時間

表3.4.1 テスト閾の極大値を与えるフィールド持続時間(msec)

$\lambda$ (nm)	460		540		640	
	5'	40'	5'	40'	5'	40'
450	200	500	200	200	200	1000
500	200	500	100	200	100	200
550	200	500	500	200	200	500
600	500	-	-	1000	200	500
650	200	500	500	500	100	500

(-は定義できなかったことを示す)

表3.4.2 Sensitization の大きさ (log 単位)

$\lambda$ (nm)	460		540		640	
	5'	40'	5'	40'	5'	40'
450	.13	.13	.16	.20	.16	.10
500	.27	.10	.10	.27	.10	.16
550	.23	.17	.10	.25	.07	.14
600	.05	-	-	.10	.10	.06
650	.11	.23	.12	.09	.11	.11

表3.4.3 テスト閾の極大値を与えるフィールド持続時間(msec)と Sensitization の大きさ(log 単位), T:40', 被験者YK

$\lambda$ (nm)	460		540		640	
	持続時間	大きさ	持続時間	大きさ	持続時間	大きさ
450	500	.21	200	.24	500	.16
500	200	.19	500	.24	500	.20
550	500	.16	500	.20	500	.14
600	-	-	-	-	1000	.04
650	500	.13	500	.18	200	.17

(-は定義できなかったことを示す)

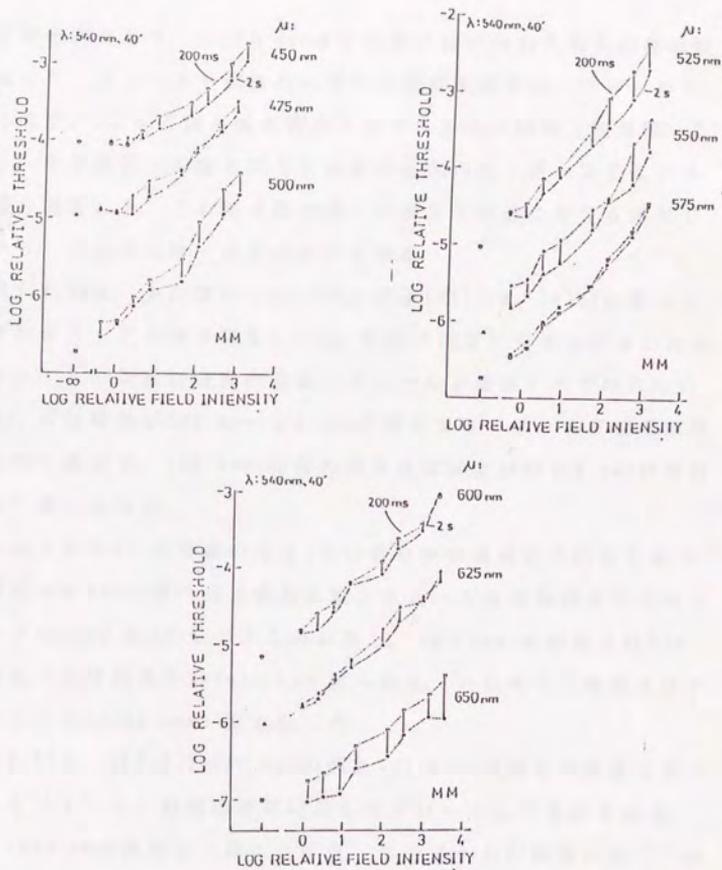


図3.4.9 フィールド強度の関数としてのテスト閾値。テスト刺激の持続時間: 200 msec (○) 及び 2 sec (●),  $\lambda = 540 \text{ nm}, 40'$ , パラメータはフィールド波長である。

なる持続時間であり、一方2 secは本実験で用いられた最長の持続時間であった。フィールド刺激のいずれの波長条件でも、フィールド刺激の強度が0の時（即ち暗黒背景）のテスト光の閾値（絶対閾）を測定し、各曲線はその絶対閾（各曲線の左端の点）が一致するように位置を調整した。この絶対閾は同一のテスト波長に対する閾値であるから、理論的には一致するはずである。

又図3.4.10は、上の図からStilesの方法(Stiles, 1978)に倣って、それぞれテスト光の絶対閾を $1.0 \log$  単位（10倍）引き上げるのに必要なフィールド刺激の強度の逆数（フィールド感度）を求めたものである。持続時間が200 msecと2 secの時とはフィールド感度曲線が明らかに異なり、200 msecの時の感度はほぼ全体的に2 secの時の感度より高くなった。

図に示された2つの曲線のもう1つの明らかな相違はその形である。持続時間が2 secの時の分光感度曲線がスムーズな単峰性又はブロードバンド(broad band)型であるのに対し、200 msecの曲線には575 nm（黄色）の時感度の谷(notch)が見られる、いわゆる二峰性又はナローバンド(narrow band)型となった。

図3.4.11は、図3.4.10の2 secの時と200 msecの時との感度の差（対数）をフィールド刺激の波長に対してプロットしたものである。差は $\mu = 600$  nmの時極小（負）となり、スペクトルの両端に向うに従って増大している。

#### § 4. 考察

本実験の結果は明らかに、フィールド刺激によって引き起こされ

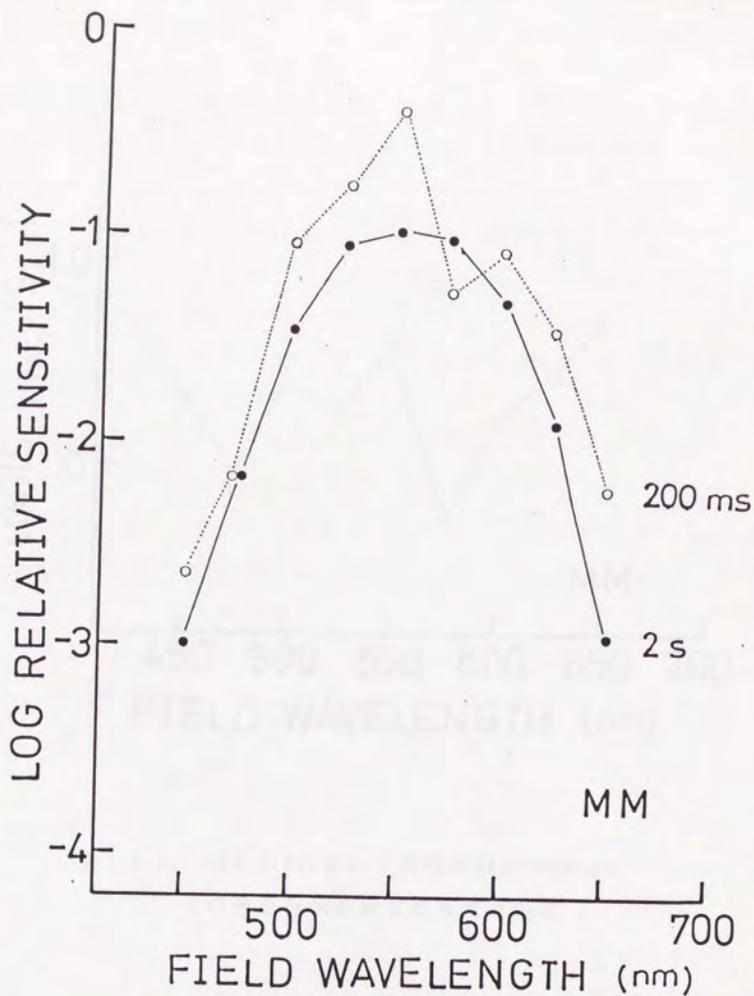


図3.4.10 持続時間が200msecの時と2secの時のフィールド感度曲線

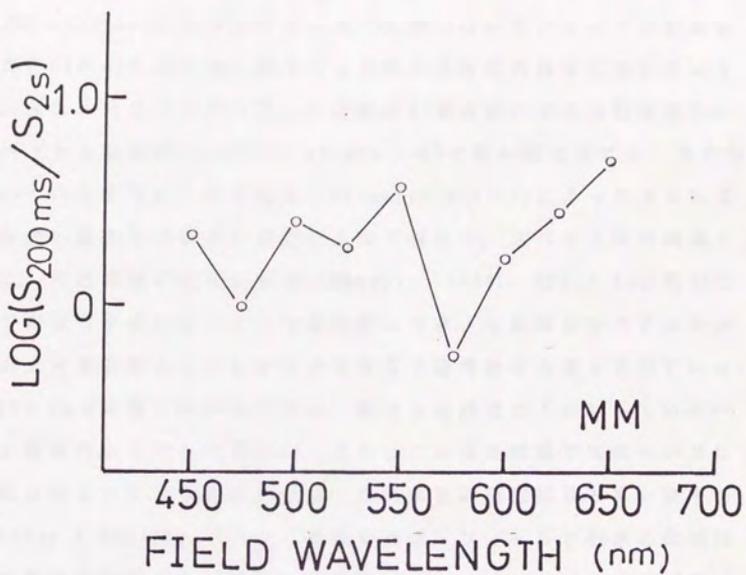


図3.4.11 図3.4.9において持続時間が200msec  
の時と2secの時との感度との差

る明るさ反応は、刺激の露出後ある時間で極大に達し、その後は減少することを示した。明るさ反応が減少し始める持続時間( $t_{max}$ )は200~500msecの場合が多かった。しかしながらフィールド刺激の波長( $\mu$ )が600 nmの時にはそうした明るさ反応の減少は生じていないか又は非常に小さかった。この領域の波長及びその特性は直ちにスペクトル飽和度(spectral saturation)を思い起こさせる。良く知られているように、輝度純度(luminance purity)によって示される単色光の飽和度は刺激の波長によって異なり、スペクトルの両端で高く、黄色領域で最低となる(Chapanis, 1944)。図3.4.11は質的にはそのことを示している。今飽和度の大きさを反対色システムの反応の大きさと考えることができるなら(通常はそう考えられている)、600 nm(黄色)の時の結果は、明るさの感覚に「寄与しているべき」反対色システムの寄与がもともとこの波長領域では無いか又は非常に小さいことを意味しよう。これは他の研究結果とも一致する(Wagner & Boynton, 1972)。換言すれば、フィールド刺激の持続時間が長い時に見られる明るさの減少(temporal sensitization)は、反対色システムが順応を生じ、その分明さ感覚への寄与が減少したためであると考えられる。

もしそうなら、図3.4.10に見られる持続時間が2 secの時の分光感度曲線(ブロードバンド型)と200 msecの時の曲線(ナローバンド型)の違いはただちに説明される。200 msecの曲線に見られた575 nm(黄色)に於ける感度の谷(notch)は上の説明を支持するものである。また刺激の持続時間がほぼ200msecの時波長弁別が最も鋭くなる結果(Siegel, 1965)も上の仮説に一致していると思われる。

反対色システムの活動の低下についてはいくつか理由が考えられ

る。その1つは順応である。本研究の実験5で、短時間提示の刺激の色（厳密にはその成分）が本実験とほぼ同じ時間のオーダー（やや短い）で変化することを示した。こうした結果は反対色システムの順応仮説を支持している。

さてフィールド刺激の持続時間が $t_{max}$ に達するまではテスト光の閾値は単調増加的に上昇した。これはフィールド刺激による時間加重(temporal field summation)を示すものである。しかしその上昇率は、テスト刺激による完全時間加重(Blochの法則)に対応する傾き1より多くの場合小さかった。これはフィールド刺激による時間加重の場合部分加重の領域が大きいことを示す。テスト刺激による時間加重にならって、上のように定義された臨界持続時間はオーダー的にはテスト刺激の場合と一致している(Mitsuboshi et al., 1987 a;b)。しかし刺激(フィールド)が大きいほど臨界持続時間が長いという結果はテスト刺激の場合とは概して逆の傾向である(Barlow, 1958)。また刺激(フィールド)の波長に依存しない点も概して合わない(King-Smith & Carden, 1976)。波長の影響という点ではむしろテスト刺激の波長の影響が見られた(青色光で長い)。

フィールド刺激による時間加重の臨界持続時間は、定義により、sensitizationが生起し始める持続時間( $t_{max}$ )が長いほど大きい。もしこれが実際に視覚系の中で生じていることならば、時間加重の限界(臨界持続時間)は、テスト刺激にしろフィールド刺激にしろ、反対色システムの順応の開始と共にもたらされると考えられる。

通常の閾値を求める実験では、本実験でフィールド刺激として用いられた刺激がテスト光として用いられる。従って持続時間の非常に短いテスト光が用いられる場合はともかく、時間加重の実験のよ

うに持続時間の長いテスト光が用いられる場合には、ここに示されたような（反対色システムの）順応の効果を考慮に入れなければならない。閾値に於ける時間加重の実験では、テスト光の持続時間が臨界持続時間より長い時にはその閾値は概して一定になるとされている。これはもちろんテスト光の時間的加重が限界に達し、それ以上長い持続時間がテスト光の閾値に寄与しないことを意味する。しかし図3.4.12に示されているように、実際には臨界持続時間より長い持続時間に於いては「順応」が生じているので、閾値は再び上昇することが予想される。現実のデータの上でそれが現れないのは、我々の閾の判断過程にそうした順応の効果が影響を及ぼさないからであろう。換言すれば、閾の判断はテスト光が提示されている間明るさ感覚が最大に達した時になされると考えられる。そうした明るさ感覚が最大に達する時とは、テスト光の持続時間が臨界持続時間以内であれば、用いられた最も長い持続時間の時であり（図中①、②）、一方臨界持続時間以上であれば（どんなに長い刺激であっても）、臨界持続時間そのものの時である（図中③、④、⑤）。

これが本実験のような特殊な方法（co-termination法）が用いられない限り、閾値実験に於いて完全加重以上の時間的加重（いわば閾値に於けるBroca-Sulzer効果）が見られない理由であると考えることができる。もしそうなら、閾上の現象であるBroca-Sulzer効果に於けるbrightness enhancementは、テスト光の臨界持続時間より長い時間的部位（主観的明るさは減少する）までも含めた全体的な反応（即ち積分）に基づいていると考えることができよう。

さてフィールド刺激の持続時間が $t_{max}$ の時における、二峰性またはナローバンドなフィールド感度曲線は改めてその過程が反対色シ

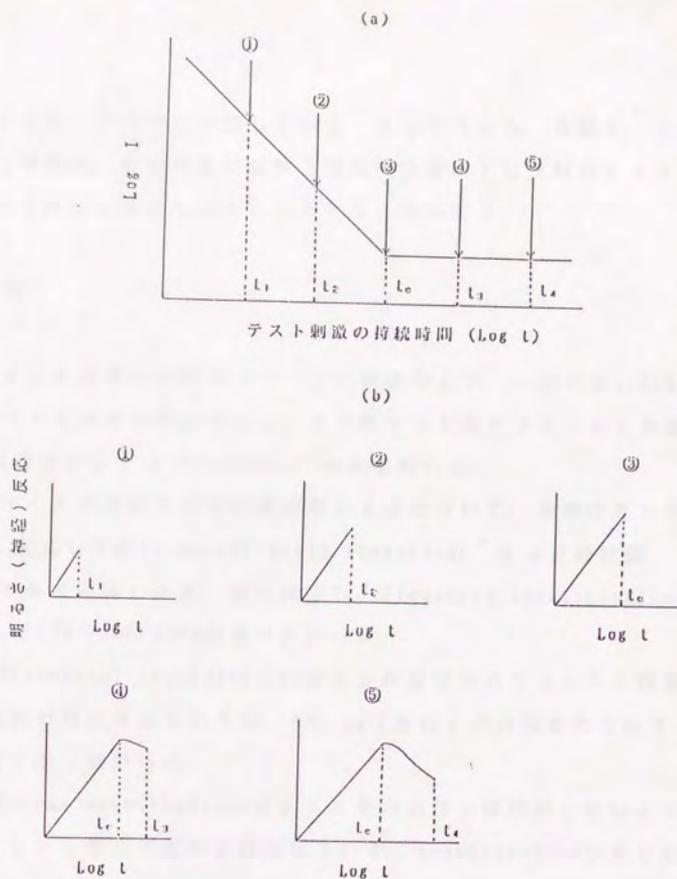


図3.4.12 時間加重実験でデータとして表れる  $\log t$ - $\log I$  曲線(a)と各持続時間の刺激に対して視覚系の内部で生じていると考えられる生理的過程(b). 閾値の判断は刺激の明るさ又は神経反応が最大となった時なされ、 $t_c$ 以降の(順応による)刺激の明るさ又は神経反応の減少は閾値に反映しない。

システムであることを強く示唆している。もしそうなら、実験5、6の結果と同様に、時間加重の限界（臨界持続時間）は反対色システムの順応の開始と共にもたらされると考えられよう。

## § 5 要約

(1)さまざまな持続時間のフィールド刺激の上で、一定の短い(20 msec)テスト光の増分閾を求めた。その際テスト光とフィールド刺激は常に同時に終了するco-termination法を用いた。

(2)フィールド刺激の持続時間が増大するにつれて、最初テスト光の閾値も増大したが(temporal field summation)、ある持続時間( $t_{max}$ )で極大に達した後、逆に減少した(temporal sensitization)。 $t_{max}$ は200~500 msecの値が多かった。

(3)このtemporal sensitizationは多かれ少なかれフィールド刺激のどの波長の時にも見られたが、600 nm(黄色)の時は非常に小さいか、全く生じなかった。

(4)temporal sensitizationはテスト光の波長には依存しないようである。しかしテスト光の面積が大きいと、sensitizationが生じ始めるフィールド刺激の持続時間が長くなる傾向にあった。

(5)フィールド刺激の持続時間が200 msecの時にはフィールド感度曲線はナローバンドとなり、一方2 secの時にはブロードバンドとなった。

(6)これらの結果は反対色システムの順応を示すものであり、その時間的オーダーの類似性から、テスト刺激に対する時間加重の臨界持続時間は反対色システムの順応が始まる時間である可能性を示唆

する。

(4) 一、

「...」

## 第4章 全体的な考察

### § 1. 視覚-大脳系の構造

序で述べたように、心理物理学的研究の目的は我々の感覚（閾値、見え等）を手がかりとして、当該の現象の基礎となっているメカニズムを解明することである。しかし我々の感覚（または意識）は、視覚の場合、眼球に入射した光刺激が視覚系の中で、さまざまな情報処理を受けた後の最終的な出力である。従ってその間には多くの過程が介在している。図4.1に網膜から大脳皮質視覚野に至る主要な信号伝達経路を示す（立花, 1991）。網膜神経節細胞（ $P\beta$ 細胞・ $P\alpha$ 細胞）（Leventhal et al., 1981; Perry & Cowey, 1981）からの出力は外側膝状体を通り大脳皮質視覚領（V1野：17野）のおもに第4層の、 $C\beta$ と $C\alpha$ 亜層に入力する。その中で色情報を伝達する第4 $C\beta$ 層からの信号はブロップと呼ばれる斑点状の部位の神経細胞（Horton & Hubel, 1981）（ブロップ細胞：および恐らくその間隙に位置する細胞）を経由してV2野（18野）へ（Livingstone & Hubel, 1984）、さらにはV4野へとつながる（Fitzpatrick et al., 1983）。一方、明るさに関する情報を伝達すると考えられる第4 $C\alpha$ 層からの信号はブロップを経由せずにV2野に送られる。なお、この図には描かれていないが、実際には視細胞から神経説細胞に至る網膜内での情報処理経路が存在する。

本研究の結果はこれまで専ら視覚系の最も早い段階に於ける神経細胞（視細胞及び網膜神経節細胞）の応答と関連づけて分析してきた。その理由は、第一に本実験で用いた刺激は形態や方位及び運動

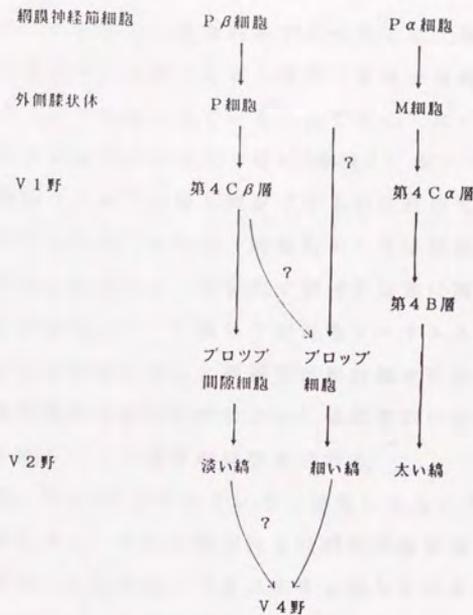


図4.1網膜以降の視覚-大脳システム P $\beta$ 細胞, P $\alpha$ 細胞  
 : サルの網膜神経節細胞の形態学的分類, P (M) 細胞  
 : 外側膝状体の小 (大) 細胞層に存在する細胞, V1野:  
 大脳皮質視覚領17野, V2野: 同18野, 第4C $\beta$ , C $\alpha$ ,  
 4B層: V1野の第4層の垂層, ブロップ細胞: v1野のブ  
 ロップ層 (第2,3層) にある細胞, 淡い縞, 細い縞, 太い  
 縞: V2野でサイトクローム・オキシダーゼの染色によっ  
 て現れる縞の部位, V4野: 色に対する応答が多く見られ  
 る視覚前野, 色の恒常性を持つ細胞があると言われてい  
 る (立花, 1991, 図10)

の要因を含まない、きわめて単純な刺激であったこと、第二に視覚系の順応（時間加重はその関数である）は単一変数の原理（Naka & Rushton, 1966）によって支配されていることである。単一変数の原理は視細胞レベルでは概ね成立する（注4.1参照）、従ってそれに合致する結果を視細胞レベルの応答と関連づけるのは自然であろう。一方もしそれに反する結果であれば、視細胞よりも中枢側のレベルの応答と関連づける必要がある。本研究で調べた現象に関与する神経機構を、その反対色性から、一括して反対色システムと呼んできたが、その候補として暗黙のうちに網膜神経節細胞を仮定した。そして第三は、網膜神経節細胞の特性については生理学的なデータが比較的蓄積されているという現実的な理由である。

こうした仮定は、図4.1に示されている（感覚に至る）大部分の過程を無視することになる。それは視細胞又は網膜神経節細胞レベルに於ける処理結果が、それ以後、「そのまま」出力されることを意味しよう。純粹にそうした事態は考えにくい。図4.1の少なくともV2のレベルまでは、色拮抗(color-opponent)型の細胞と非拮抗(broad-band)型の細胞が並列して見られることは、ある意味で網膜神経節細胞に於ける処理結果がそのまま高次視覚中枢に伝達される経路が存在していると考えられよう。前者に至る経路が広い意味での「色チャンネル」であり、後者に至る経路が「輝度チャンネル」である。刺激が「見えた」あるいは刺激の「色が感じられた」（色名の認識とは異なる）という意識は大脳皮質のどの部位で生じるかは、生きた人間を用いた実験は不可能であるから、特定するのはむずかしいが、大脳皮質の視覚領（V1, V2野）で生起するのかも知れない。

また本研究では受容器以降の過程として「輝度チャンネル」は採

用しなかった。その最も大きな理由は、その基礎となっている一過性(phasic)細胞が反対色性を示さない点である。従ってその応答（及び順応）の大きさは刺激の分光分布がどのようなものであれ、刺激の強度（光量子）の和にだけ依存すると考えられる（加算性）。それ以外の理由については本章の§3で述べることにする。

## § 2. 時間加重の錐体（または受容器）モデル

視覚系に於ける時間加重現象はいわゆるBlochの法則(Bloch, 1885)として最も良く知られている視覚機能の1つである。しかしこれまで報告されている研究は時間加重の臨界持続時間（以下も。と略す）に関するパラメトリックなものが多く、そのメカニズムについては殆ど明らかにされていない。かつては光化学反応に見られる光の強度と照射時間との間の逆数関係（Bunsen-Roscoeの法則と呼ばれる）との類似性から、視覚的な時間加重も光化学的な過程、即ち視物質のisomerizationで生じていると考えられたこともあったが、今では次のような根拠から、そうした光化学説は疑問視されている(Boynton, 1961)。

① 光照射後の溶液ロドプシンの濃度の変化は光(20 $\mu$ sec)照射後ほぼ0.5msec以内に生じる。これはその後(0.5msecよりも後に)光が継続して(しかし臨界持続時間以内で)同じ受容器に与えられた場合、異なった2つの光化学的反應を引き起こす可能性を示唆する。従ってそれらは2つの別々な光として信号が中枢に送られることを意味する。

② 閾値事態では、2つまたはそれ以上の光量子が同じ受容器の視細

胞に吸収される確率はほとんどない。従って（時間的な）加重は光化学的過程では生じ得ない。

- ③空間的に離れた部位に提示された2刺激は距離が十分小さければ完全時間加重を生ずる。これは異なった部位の受容器が時間加重現象に関与していることを示す。

しかし視物質レベルではないものの、視細胞（錐体、杆体）レベルを時間加重の基礎として想定する見方はかなり根強い。そうした受容器仮説（ここでは錐体モデルと呼ばれた）が基づいている主な根拠をまとめると以下のようなものである。

- ①上に示したBunsen-Roscoeの法則との類似性
- ②錐体受容器電位の立ち下がりの時定数が背景強度と共に小さくなる（図4.2）。これは時間的分解能が高くなることを意味する。
- ③錐体と杆体及び各錐体の間の時間特性（c f f等）の違い（第1章参照）。
- ④背景強度が増大するにつれて $t_0$ は減少する（Barlow, 1958他。本研究に於ける実験1の結果）。
- ⑤青色光に対する $t_0$ が特に長い（実験1）。
- ⑥ $t_0$ の波長特異性（同）。
- ⑦Stilesの各 $\pi$ メカニズムがそれぞれ固有の加重時間を持つ（Krauskopf & Mollon, 1971; Uetsuki & Ikeda, 1971）。

このうち①は上に述べたように概して否定されつつある。②はかなり有力な根拠であると思われるが、これはどこまでも純粹に受容器だけの反応であり、それ以後の多くの過程を経た結果である視覚的な反応（閾）と必ずしも同一視することはできない。この結果はむしろ受容器レベルでは、背景強度の増大と共に $t_0$ が短くなること

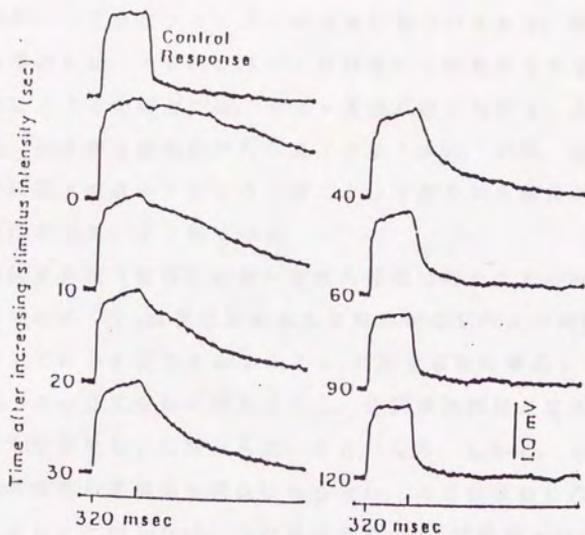


図4.2 背景輝度によるサルの細胞外錐体電位の時間  
 的变化 刺激: 320msec, 0の曲線は暗順応下  
 に於ける応答を示し, 数字が大きくなるほど背景  
 強度が増大する. 背景強度と共に波形の立ち下  
 がりの時定数が小さくなることに注意(Whitten  
 & Brown, 1973).

を示している点で重要であるように思われる。従って、もし閾値が専ら受容器レベルでの反応に基づいているとすれば、 $t_0$ は背景の強度と共に減少することが予想されよう。

③に関しては、 $cff$ は時間加重と似た過程に基づいていると考えられるが、 $cff$ はフリッカーの知覚に基づいており、特に周波数が高い場合には、増分閾に基づく時間加重とは異なる可能性もある。実際に $cff$ の場合には、テスト混合事態でもフィールド混合事態でも、加算的な結果が得られた（三星・木村，1989，未発表資料）。それは丁度最小フリッカー法によって得られた輝度がほぼ完全に加算性を示すことと似ている。

さて④は受容器（錐体）が単一変数の原理に従うことからの類推に基づいている。 $t_0$ は視覚系のある過程の順応レベルの関数（単調減少関数）であると仮定するなら、 $t_0$ の発生場所は順応レベルが背景刺激の、その分光分布に関わりなく、単調増加関数となるような過程、即ち錐体でなければならぬことになる。しかし、もし $t_0$ が背景刺激の強度の単調減少関数にならない、あるいはむしろ単調増加関数となることがあれば、それは必然的に $t_0$ は順応レベルが必ずしも刺激強度の単調増加関数とはならない過程に影響を受けていることを意味する。これは本研究の実験2の結果に他ならない。この

---

4.1) (次頁) 錐体間の電気シナプスや水平細胞からのフィードバックが背景の光によってその強さが変化する可能性もある（立花，personal communication）。その場合には単一変数の原理の存立自体が問われることになる。ここでは一応原理の存立を前提として考察を行うことにしたい。

点で時間加重を錐体のレベルだけに帰そうとする仮説は説得力に欠ける<sup>4.1)</sup>。

⑤は本研究以外に、これまでいくつかの研究で報告されてきた。しかしながら実験1で述べたように、テスト刺激が小さい場合は波長の効果が見られないという報告が多い(Rouse, 1952; Sperling & Jolliffe, 1965; King-Smith & Carden, 1976)。これは $t_c$ が、小さいテスト刺激に対して感度が悪い過程(即ち反対色システム)と相関を持っていることを示唆している。

⑦については、Stilesの $\pi$ メカニズム自体が錐体と同一でなく、反対色システムを内含した「複合システム」であると指摘することが出来よう。しかし必ずしも強い否定的な結果はないように思われるが、もし他のモデルによってうまく説明されれば、必ずしも錐体モデルに固執する必要はないであろう(⑥も同じ)。

## § 2. 反対色システムの関与

時間加重現象に於ける反対色システムの関与を示すデータはこれまでに報告されていない。本研究の実験2と3はこれを明瞭に示した。また最近これを支持する有力な結果が共同研究者の川端によって示された。図4.3は色覚異常者(第一異常)を用いたテスト混合(R/G条件)の結果である(Kawabata, 1990)。 $t_c$ は白色背景の輝度レベルにかかわりなく、テスト刺激の混合率に全く依存していない。良く知られているように、色覚の第一異常者(いわゆる赤色盲)はR錐体を欠き、それと同時にr-g反対色システムをも欠いていると考えられる(Hurvich, 1981; 三星・長谷川, 1987)。 $t_c$ のテス

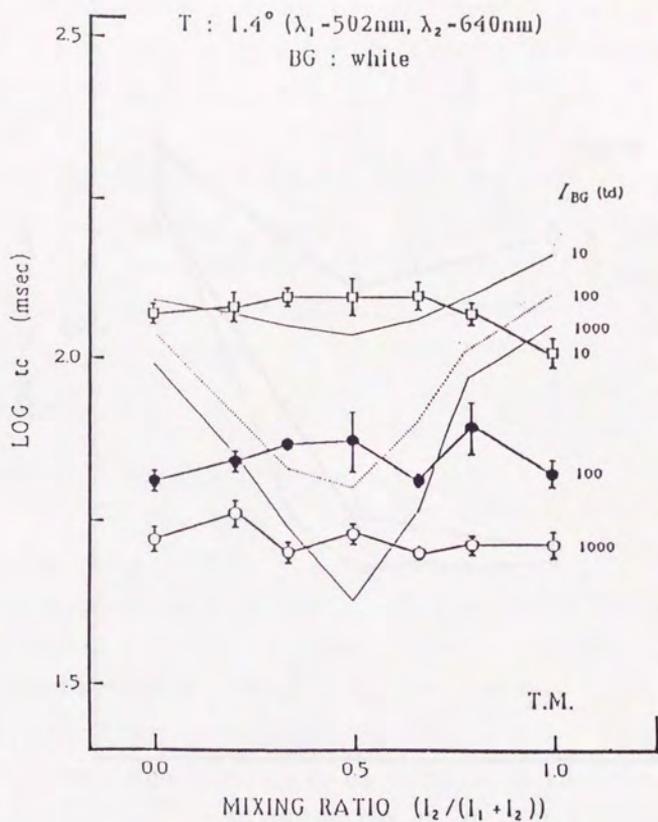


図4.3 第一色覚異常者(赤色盲)の臨界持続時間  
テスト混合(R/G条件), 図中の細線は色覚正  
常者の結果を示す. パラメータは背景強度  
(Kawabata, 1990).

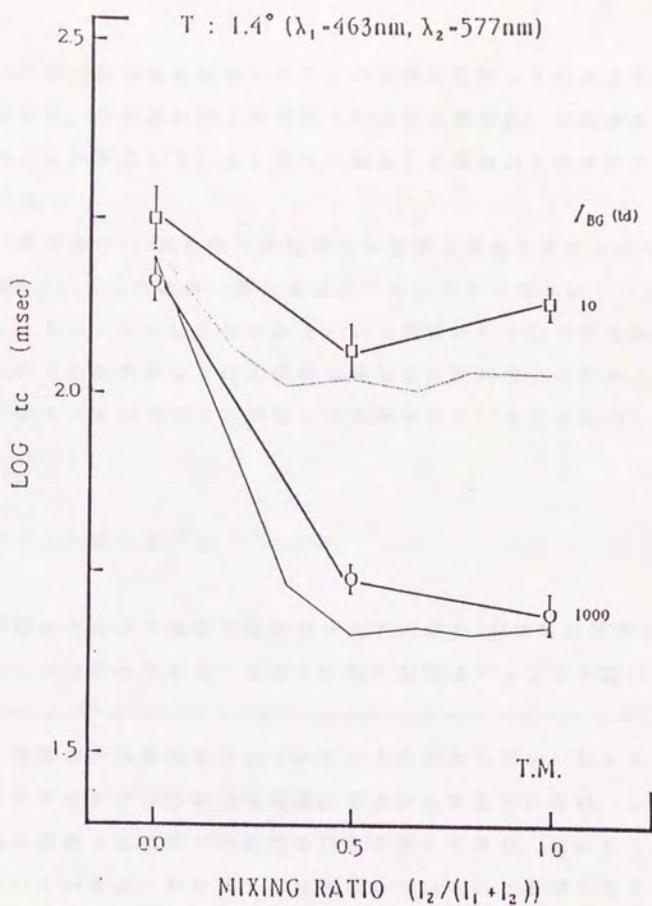


図4.4 第一色覚異常者（赤色盲）の臨界持続時間  
 テスト混合（Y/B条件），図中の細線は色覚正  
 常者の結果を示す．パラメータは背景強度  
 (Kawabata, 1990).

ト混合率への非依存性は反対色システムの欠損に起因していることは明らかである。ちなみに第二異常者（いわゆる緑色盲：G錐体とr-gシステムが欠損していると考えられる）の場合にもほぼ同じ結果であった。

一方第一異常者のY/B混合条件の結果では色覚正常者と変わりがなかった（図4.4）。これは第一異常者はr-gシステムは欠いているものの、y-bシステムは正常であるという仮説から十分予想される<sup>4, 2)</sup>。これらの結果は全て視覚系の時間加重に反対色システム（この場合にはr-gシステム）が疑いなく関与していることを示している。

### § 3. チャンネル直列モデル

しかし問題はどのような形で反対色システムが $t_0$ の決定に関与しているのかということである。その1つの可能性はチャンネル直列

---

4.2) 第一異常者がR錐体を欠いているにもかかわらずy-bシステムは正常であるという仮定は奇異に思われるかも知れない。しかし彼らは黄色（及び青）の感覚を持ち合わせており、色の見えと結び付いているy-bシステムは機能していることを窺わせる。この点は色覚異常の大きな議論点の1つである。今のところ定説はないが、その1つは、R錐体がG錐体にとって代わられているが、その神経興奮は（もともとの）R錐体が入力すべき場所（大脳あるいはこの場合にはy-bシステム）に入力しており、その場所に固有の反応（赤）を引き起こす（同時に入力される「緑」と共

モデル（三星，1986a）である。具体的にはPugh(1976)の2サイト順応モデルを指す。もう1つはチャンネル並列モデルであり、具体的にはKing-Smith & Carden(1976)のモデルを指す。前者は本研究のフィールド混合実験（実験2）の結果と、一方後者はテスト混合実験（実験3）とそれぞれ密接に関連していた。

図4.5はPughの2サイト順応モデル（ $\pi 1$ の場合）を図示したものである（Pugh, 1976）。このモデルはそもそもはStilesの $\pi$ メカニズムの順応異常（フィールド非加算性）を説明するために構築されたものであるから、元来は閾値の変化を扱うモデルである。さらに彼のモデルでは、反対色システムの「反対色性」（打ち消し性）だけが組み込まれており、反対色システムの時間・空間的な特性及びその生理学的な基礎と考えられる反対色細胞（網膜神経節細胞）の構造（受容野）については全く触れられていない。時間加重のメカニズムを考える上では、その点が重要であると思われる（それについては「§5. メカニズム」の項で触れることにしたい）。

とはいえし。は視覚系の順応の関数であると考えられるから、時間加重にこのモデルが適用されるのは自然であろう。上に見たように、このモデルは、（背景刺激によって）反対色システムの順応レベルが操作される条件に於ける結果（実験2及び実験1の一部）はうまく説明できた。また実験1の波長特異的な結果の説明も無理ではなかった。

しかし視覚系に順応が生じているとは考えられないテスト混合の結果（実験3）に対しては、モデルをそのまま適用することはでき（続き）に「黄色」の感覚を生ずるとするものである（詳細は三星・長谷川,1987を見よ）。

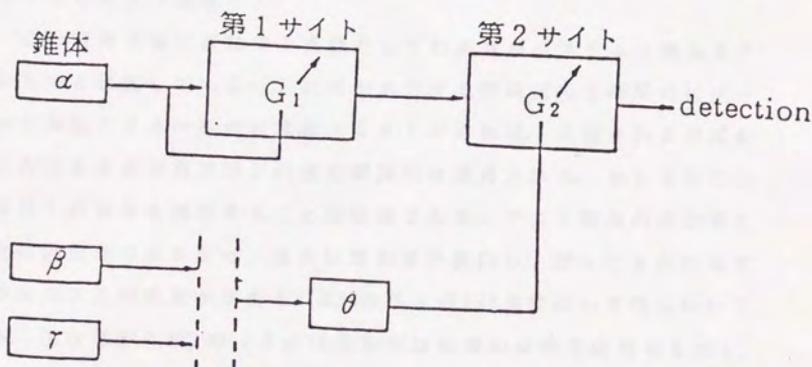


図4.5 Pugh (1976) の単一経路、2 サイト順応モデル (single-pathway, two-sites adaptation model)。 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  はそれぞれ青 ( $\pi_3$ ), 緑 ( $\pi_4$ ) 及び赤 ( $\pi_5$ ) 錐体を表わす。 $G_i$  ( $i=1, 2$ ) は "gain control" の意である。

なかった。それに対する1つの可能な説明は、実験3の項で述べたように、システムの「感度」による説明である。システムが明順応すると感度は低下する。従って図4.5に示されている「検出器(detector)」がテスト刺激を検出するには、より大きな神経反応が入力される必要がある。これは当然錐体レベルではより多くの光量子吸収が必要であることを意味し、従って閾値データでは、閾値の上昇として表われる(実験2)。

この時検出器に直結する過程としての反対色システム(検出器そのものと仮定してもよい)に何か入力する神経反応を時間的にプール(加重)する一定の容量のユニットがあれば、入力される神経反応の大きさと加重時間との逆相関関係は説明される。もしそうなら、実験3の結果を説明することは容易である。テスト刺激の混合率と共に混色光の波長及び/または飽和度が増加し、従ってそれに対するシステムの感度が変わる。R/G条件及びY/B条件のいずれに於いても、混合率が1.0の時(その時混色光は前者の条件では黄色を呈し、後者の条件では白色に近い色となる)システムの感度が最低となり、それだけ反対色システムに対してより多くの神経反応の入力が必要となり、結果的にもその短縮をもたらすのである。このようにフィールド混合の結果及びテスト混合の結果は「システムの感度」によって統一的に説明される。

#### § 4. チャンネル並列モデル

「システムの感度」による説明は「チャンネル並列モデル」につながる。上に述べたチャンネル直列モデルによるテスト混合の結果

(実験3)の説明では、主に反対色システムの感度の変化に基づいていた。もしこの時刺激の検出システムに反対色システムだけを想定するなら、反対色システムが刺激を検出することを意味する。これはチャンネル並列モデルの仮定の1つである。図4.6にモデルの模式図を示す(Wandell & Pugh, 1980 b)。このモデルが立脚する根拠は以下の事柄である。

① 反対色細胞(opponent-color cell)と非反対色細胞(non opponent-color cell)の存在

② テスト刺激の持続時間及び大きさによる分光感度曲線の相違: 持続時間の長い刺激または面積の大きい刺激は反対色システムによって検出される→ナローバンドな曲線。一方持続時間の短いまたは面積の小さい刺激は「輝度システム」(非反対色システム)によって検出される→ブロードバンドな曲線)(King-Smith & Carden, 1976, 本実験4及び実験7の結果)。

③ 打ち消しの反加算性も持続時間の長いまたは面積の大きい刺激に対してだけ見られ、短いまたは小さい刺激に対しては見られない(Wandell & Pugh, 1980 a; b, 本実験2の閾値データ)。

このようにチャンネル並列モデルでは、刺激は反対色システムか、または輝度システムのどちらか感度の高い方によって検出されると仮定される。従ってもは感度の高い方、即ちテスト刺激を検出してあるシステムの加重時間となる<sup>4, 3)</sup>。

King-Smith & Carden (1976)の仮説は基本的には得られた分光感度曲線の形から構築されたものである。時間加重に関しては、1000 Tdの白色背景上で、いくつかの単色光に対する加重時間を求めてみると、黄色光に対する臨界持続時間は短く、一方それ以外の波長の

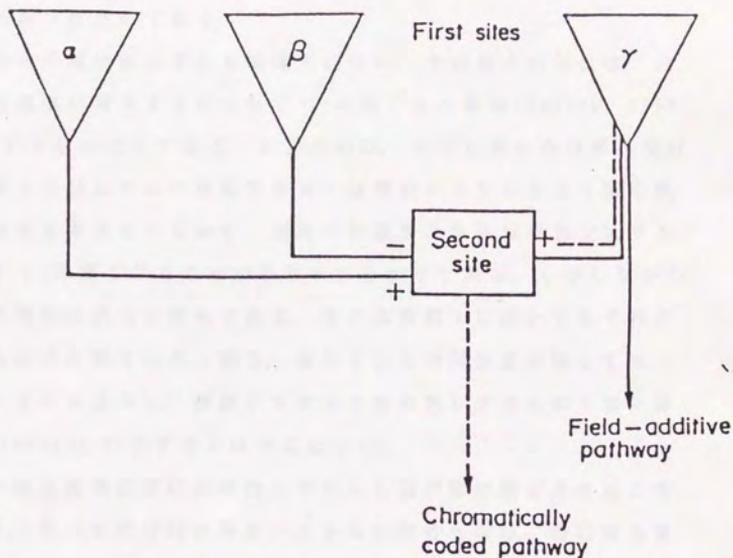


図4.6 チャンネル並列モデルの模式図  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  :

錐体 (図4.5を見よ), 短い持続時間及び/又は小さいテスト刺激はフィールド加算的な経路(Field-additive pathway)によって検出され, 一方長い持続時間および大きいテスト刺激はフィールド非加算的な経路(Chromatically-coded pathway)によって検出される (Wandell & Pugh, 1980 b).

光に対する臨界持続時間は長いという結果が得られた。そこから彼らは輝度システム（黄色光を検出している）の時間加重は小さく、反対色システム（黄色光以外の単色光を検出している）のそれは大きいと結論づけたのである。

さて彼らの論理は必ずしも明確ではない。その最大の弱点は、白色背景の強度が増大するにつれても、が短くなる事実(Barlow, 1958)を説明できないことである。と言うのは、そうした白色背景（反対色システムに対しては中性的である）は輝度システムをより強く順応させると考えられるから、相対的に優勢となる反対色システムによっても、は長くなることが予想されるからである。しかしながら、そうした報告は過去に皆無である。また本実験1に於いてもそれと矛盾する結果が得られた。即ち、少なくとも時間加重に関しては、彼らが仮定するように、輝度システムと反対色システムの「切り替え(switching)」が生ずるとは考えにくい。

又強い有色背景は逆に反対色システムを選択的に順応させると考えられる。従って相対的に輝度システムが優勢となり、特に黄色領域のテスト刺激に対するも、が短くなることが予想されるが、これも事実と反する。例えば520 nm背景の時、背景輝度が増大するにつれても、は短くなったが、その曲線の形は不変であった（実験1）。

さらに本実験で得られた波長特異的な結果は輝度システム／反対

---

4.3) (前々頁) このモデルには、すべての刺激の検出は反対色システムが行い、その反対色システムの波長応答特性が刺激の物理的な特性（持続時間の長短又は面積の大小）によって変化すると仮定するモデル（例えばFinkelstein & Hood, 1982）も含まれる。

色システム仮説では説明が困難である。検出閾あるいは増分閾に於ける輝度システムの役割自体も疑問的である (Mitsuboshi, 1983. これについては参考論文を参照されたい)。

#### § 5. 時間加重のメカニズム

これまでの実験結果及び議論から、視覚系の時間加重に反対色システムが大きな役割を果たしており、その感度、即ちある一定の大きさの神経反応を出力するのに必要な入力の大さの逆数、によってフィールド混合及びテスト混合のどちらのデータも統一的に説明されることが明らかとなった。

ところで、反対色システムの「感度」はどのような機序に基づいているのであろうか。その生理学的な基礎はいかなるものであろうか。これは、前述したように、反対色細胞 (網膜神経節細胞) の、on中心、off周辺型の受容野 (receptive field) を思い起こさせる<sup>4, 4)</sup>。図4.7は典型的な+R/-G型反対色細胞の受容野の構造を示したものである (tonic型) (Zrenner, 1983)。この型の細胞は受容野を赤色光で照射した時強く反応 (on反応) し (この時感度は低下している。従ってこの上に提示された赤色のテスト刺激に対する閾値は高くなる)、光を消すと反応レベルは低下する。一方受容野を緑色光で照射すると (on) 反応は低下し (従って感度は高い)、緑色光を消すと反応は (抑制が解除されるので) 再び復活する (off反応)。結局+R/-G型の細胞は、中心領域にR錐体からの興奮の入力を受け、一方周辺領域にはG錐体からの抑制的な入力を受け (図中左)、その入力の差 ( $r - g$ ) を上方に送る。この差信号が大きいほど刺激

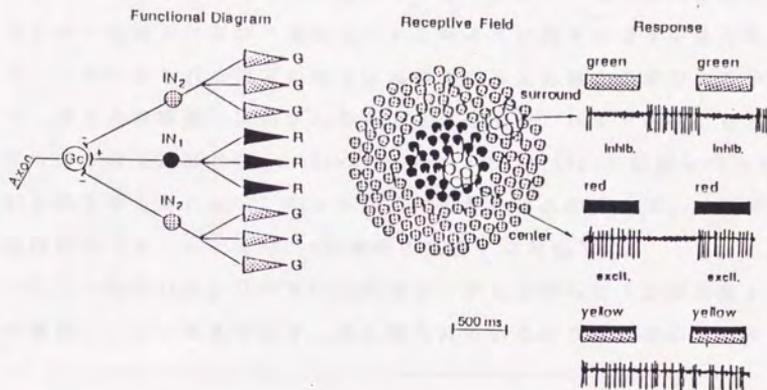


図4.7 +R/-G型反対色細胞 (tonic型) の受容野構造

図左 (機能図) の R, G: R 錐体, G 錐体,  $IN_{1,2}$ : 中継ニューロン,  $G_c$ : 網膜神経節細胞, 図右 (上): 受容野全体を緑色光で照射した時の反応パターン, (中): 同赤色光で照射した時の反応パターン, (下) 同黄色光で照射した時の反応パターン, 図中は推定される受容野の構造時間スケールは刺激の持続時間を示す (Zrenner, 1983).

に「強い赤味」と「明るさ」が含まれていることを意味する。

ここで受容野を黄色光（赤+緑）で照射すると、細胞の反応は低下する（図中右下：すなわち感度は上昇する）、これは黄色光に対してはR錐体もG錐体も同程度の感度を有していて、反応の差（ $r-g$ ）が減少すると考えれば説明される。この時大脳の検出器には最小の「赤味」（及び「緑味」も）と明るさに関する信号が送られる。上方に送られる信号の強さは両錐体の反応の強さの差であるから、黄色光の強度には依存しない。これこそがこれまで述べてきた打ち消しの反加算性(cancellative sub-additivity)の細胞レベルでの根拠と考えられる。このように反対色システムの「感度」は反対色細胞の（ $r-g$ ）（+R/-G型細胞の場合）に対応する。

ここで比較的分かりやすい反対色システムの順応と「空間加重」の関係について考えてみる。良く知られているように、順応レベル

---

4.4) (前ページ) サルの神経節細胞中、+R/-G型は21%と最も多く、ついでG/R型の11%という報告がある。ちなみに-R/+G型及び-G/+R型は少なく、それぞれ5%、9%であった(Zrenner, 1983)。またそれら tonic型の細胞はその多くが反対色性を示し(約80%)、主に網膜中心部に分布している(Zrenner, 1983)。またR錐体とG錐体からの混合入力のあるy/b型やb/y型も存在する。一方phasic型(約10%を占める。立花, 1991)は同心円状の中心-周辺型拮抗型の受容野を持ち、on型とoff型に分類されるが、波長特異的な応答を示さない。応答は一過性(phasic)である。これら以外にも、例えば非同心円状の受容野を持ち、動きによく応答するものもあるが、色覚には関与しないと思われる(立花, 1991)。

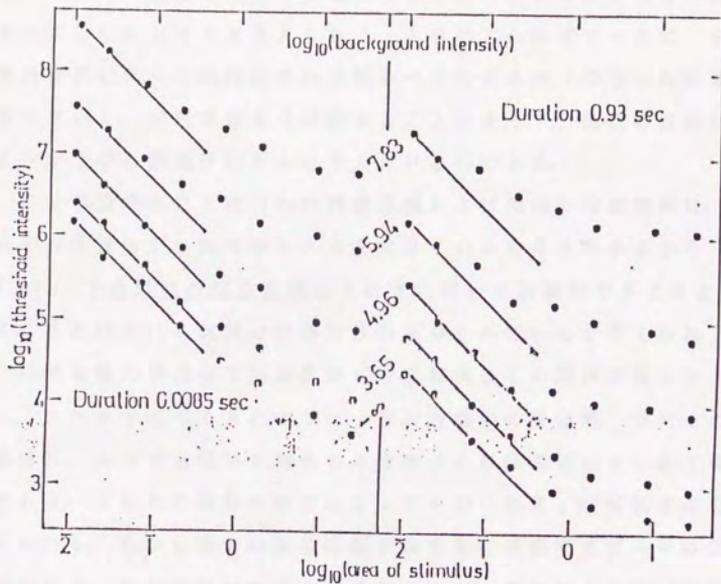


図 4.8 背景刺激に輝度と空間加重 (Barlow, 1958)

が増大すると、時間加重と同様に、空間加重が生じる限界の面積（臨界加重面積、 $A_c$ ）は減少する（図4.8 Barlow, 1958）。またそれに対応すると考えられる、on中心、off周辺型細胞の受容野のon領域（興奮の加重領域）も小さくなることが知られている（Kuffler et al., 1957）。即ち空間的な加重の変化は反対色細胞の受容野のon領域の変化に対応すると考えられる。本研究との関連でいえば、強い赤色背景によって細胞は高い活動レベルにあるが（中心の加重領域は小さい）、緑色背景をつけ加えることによって、細胞の反応は弱まりかつ中心領域は広がると考えられるのである。

ここで重要なことは中心の興奮領域および周辺の抑制領域は、それぞれR錐体とG錐体から入力を受けていると考えられるから（図4.7）、その領域の反応自体は入射光に対して加算的であることである。また同時に各錐体の時間特性が保持されていると考えられる。

時間加重の場合は空間加重ほど受容野構造との関係が明らかでない。これまで述べてきたように、反対色細胞の受容野、特にそのon領域に、入力する信号を加重する特性があれば説明はきわめて容易である。すなわち細胞の感度によってその「容量」が変化すると考えられる。しかし著者の知る範囲ではそれに対応するデータは見当たらない。むしろそれに否定的であることを思わせる結果が報告されている。図4.9は+R/-G型細胞で、ある一定のスパイク数の増加を引き起こすのに必要な刺激光の強度を200msecと10msecの持続時間に対して求めたものである（いわゆるアクションスペクトルである）（Zrenner, 1983）。注目されるのは刺激の持続時間によって、黄色の領域を除き、必要な刺激強度に大きな差がないということである（スペクトル特性についてはここでは触れない）。もし200msecの持

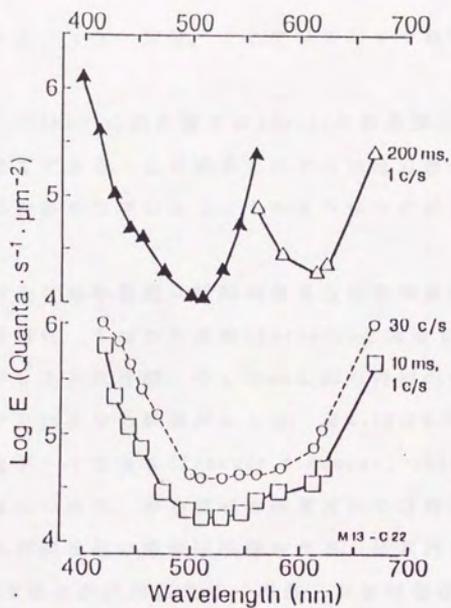


図 4.9 +R-G型細胞のアクションスペクトル

刺激の持続時間: 200msec (上), 10msec (下)

白色背景: 30,000Td (Zrenner, 1983)

続時間が加重の臨界持続時間以内と考えることができれば、

$$I \cdot t = c \quad (c: \text{定数, ここではスパイク数})$$

を満たすためには、200msecの刺激強度は10msecの刺激強度の1/20 (-1.3 log)ですむはずである。この結果だけからは反対色細胞の構造の中に単純に時間加重を生ずるユニットのようなものがないことを暗示している<sup>4, 5)</sup>。

それに対する1つの可能な仮説は時間加重を反対色細胞の受容野周辺領域の時間応答特性、すなわち潜時(latency)と関連づけることであろう。光刺激が与えられた時、中心のon反応も周辺のoff反応も、反応が発現するまでには多少の時間がかかる。図4.10はR/G型tonic細胞の潜時に関するデータである(Zrenner & Gouras, 1978)。刺激の周波数が高くなるにつれて、中心領域の興奮反応の潜時はやや長くなり、一方周辺の抑制反応の潜時は短縮される。結果的に中心のon反応と周辺のoff反応とが同時に生じ、興奮-抑制関係は失われる。これは共働作用(synergism)または位相シフト(phase shift)と呼ばれる。持続時間の短い刺激に対する効果は高い周波数の刺激に対する効果と基本的に同じであるから(Enroth-Cugell & Pinto, 1972)、短い持続時間に対しては周辺からの抑制がかからない。これは逆に

---

4.5) この結果は30,000Tdという強い白色背景のもとで得られたものである。従って臨界持続時間は200msecよりもはるかに短くなっている可能性がある。

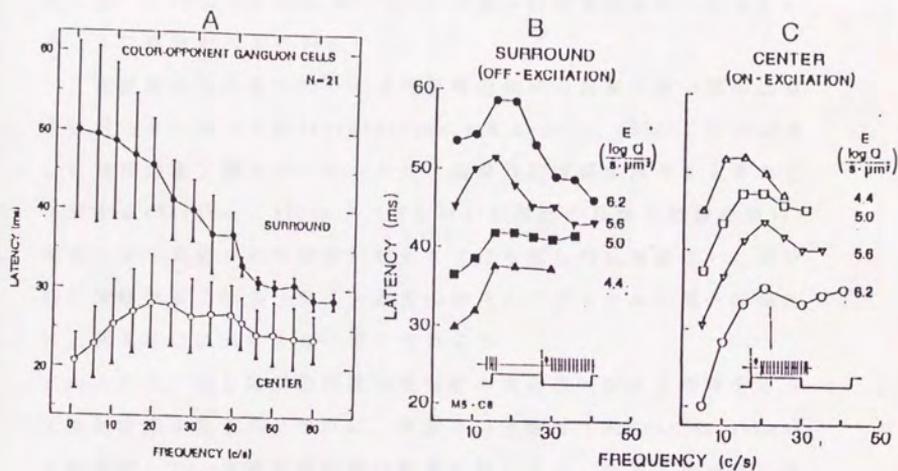


図4.10 刺激の時間周波数の関数としてのサルの  
 反対色細胞の反応潜時 (R/G型 tonic細胞)  
 テスト: 20°, 白色背景: 30,000Td  
 (Zrenner & Gouras, 1978)

いえば、持続時間の長い刺激に対しては、ある時間の潜時をもって、周辺から抑制が働くことを意味する。この時一つの可能な仮説は、周辺からの抑制反応が発現するまでの潜時が反対色システムの臨界加重時間に対応すると考えることである。図4.10では潜時はかなり短い。この場合にも30,000Tdという強い白色背景が用いられていることに注意すべきである。

この位相シフトをもたらす受容野周辺領域の抑制反応の潜時は背景強度と共に減少する(Enroth-Cugell & Lennie, 1975)。これはまさに背景強度(順応レベル)と共に臨界持続時間が減少する事実と一致する(Barlow, 1958)。一方互いに反対色からなる刺激を用いた場合には、周辺からの抑制が弱まり(打ち消しの反加算性)、結果的に潜時は長くなる(テスト混合の場合)、フィールド混合の場合にも基本的には同じように考えられよう。

このように、もし反対色細胞の受容野の周辺領域がある潜時をもって抑制反応を生ずるとすれば、本論文の実験4(summation indexによる研究)で、持続時間の短い刺激に対しては、たとえ反対色の組み合わせでも、加算性を示した結果をただちに説明できる。また実験5, 6, 7(co-termination法による研究)で、刺激提示のある時間の後色反応及び明るさ反応が減少した結果も、少なくとも定性的には説明されよう。

ところで、受容野の中心領域より小さい刺激に対しては周辺領域からの抑制反応ははたらかないと考えられる。これは上のような仮説に従えば、そのような小さい刺激に対する時間加重は $+\infty$ となることを意味する。もちろんそのようなことは有り得ないから、小さい刺激に対する時間加重もどこかのレベルで限界づけられていると

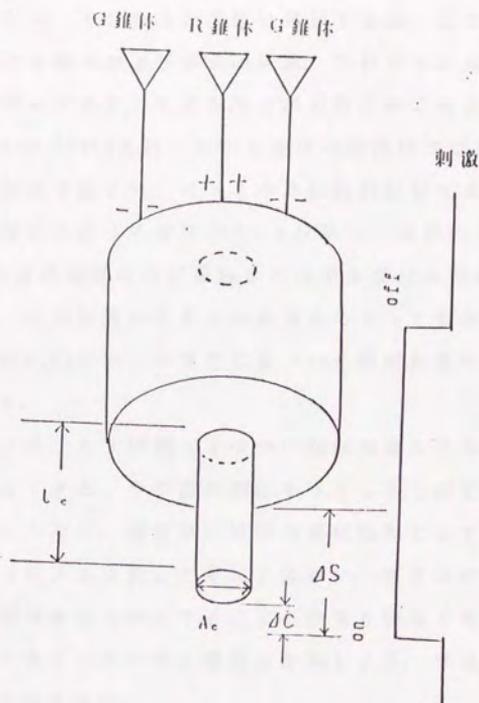


図4.11 時間加重及び空間加重を説明する反対色細胞の受容野の時・空間的構造モデル(+R/-G型の場合)  
 $\Delta c$ : 受容野中心領域の反応潜時,  $\Delta s$ : 受容野周辺領域の反応潜時,  $A_c$  (空間加重の臨界直径)は受容野中心部の面積に対応し,  $t_c$  (時間加重の臨界持続時間)は $\Delta s - \Delta c$  (各領域の反応潜時の差)に対応する.  
 図右は刺激の時間的パターンである.

考えざるをえない。その有力な候補は錐体である。上で述べたように、受容野の中心領域および周辺領域は、それぞれおもに単一の錐体から入力を受けており、その領域の反応自体は入射光に対して加算的 (summation index 実験) かつ各錐体の時間特性が保持されていることを思い起こせばよい。従って小さい刺激に対するものは反対色細胞の中心領域に入力する錐体のものを反映し、面積の大きい刺激に対するものは反対色細胞の周辺領域から抑制を受けるため、一般的には短くなろう。これは過去に多くの研究者によって報告されてきた事実である。図 4.11 は以上の考察に基づいた時間加重のメカニズムの模式図である。

以上反対色システム (細胞) を中心に時間加重のメカニズムについて考察を加えてきた。やや思弁的になってしまうのでこれ以上は触れないことにしたい。視覚系の時間加重は現象としては単純であるが、そのメカニズムは決して単純ではない。またその生理学的な知見との対応関係を明らかにすることもかなり困難である。いずれにしてもさらに多くのデータと理論とを要しよう。今後に残された課題は決して少なくない。

## 第5章 結論

本研究では人間の視覚系の時間加重特性に関していくつかの心理物理学実験を行い、そのメカニズムについての考察を行った。フィールド混合実験（実験2）及びテスト混合実験（実験3）の結果は疑いなく視覚系の時間加重に反対色システムが大きな役割を果たしていることを示す。背景強度の増大と共に臨界持続時間も増大する結果および臨界持続時間がテスト刺激の分光分布に依存するという結果は過去に誰も報告しなかったものである。

しかしそのメカニズムは決して単純ではない。本研究の契機となったPugh (1976)の2サイト順応モデルは、フィールドの分光分布と視覚系(Stilesの $\pi$ メカニズム)の順応との関連性の分析にのみとどまり、その時間・空間的な特性については触れられていない。

もし反対色システムの生理学的基礎として網膜神経節の反対色細胞(spectrally-opponent細胞)を考えることができるのであれば、視覚系の空間的加重がその受容野の中心領域の大きさ(それは順応レベル→周辺領域からの抑制反応の強さに依存する)と相関しているように、時間加重も何らかの方法で、反対色細胞の受容野構造と関連していると予想される。その1つの可能性として、ここでは周辺領域からの抑制反応の潜時(latency)を想定した。すなわち順応レベル(それは刺激の分光分布に依存する)によって周辺抑制反応の潜時が変化すると仮定された。また同時に抑制反応がはたらかない事態(c.f. 小さい刺激)では、受容野中心部に入力する錐体(加算性を示す)の加重特性となることが示唆された。

引用文献

Barlow H. B. (1958) Temporal and spatial summation in human vision at different background intensities. *J. Physiol.* 141, 337-350.

Bartley S. H. (1961) A clarification of some of the procedures and concepts involved in dealing with the optic pathway. In R. Jung & H. Kornhuber (Eds.) *The visual system: Neurophysiology and psychophysics*. Springer-Verlag, Berlin.

Baylor D. A., Nunn B. J. & Schnapf J. L. (1987) Spectral sensitivity of cones of the monkey *Macaca Fascicularis*. *J. Physiol.* 390, 145-160.

Blackwell H. R. (1963) Neural theories of simple visual discriminations. *J. opt. Soc. Am.* 53, 129-160.

Bloch A. M. (1885) Experience sur la vision. *Comptes Rendus de Seances de la Societe de Biologie (Paris)* 37, 493-495.

Boynton R. M. (1963) Contributions of threshold measurements to color-discrimination theory. *J. opt. Soc. Am.* 53, 165-

- Boynton R. M. (1972) Some temporal factors in vision. In W. A. Rosenblith (Ed.) *Sensory communication*, Pp. 739-756, John Wiley & Sons, New York.
- Boynton R. M. (1979) *Human color vision*. Holt, Rinehart & Winston, New York.
- Boynton R. M., Das S. R. & Gardiner J. (1966) Interactions between visual photopic mechanisms revealed by mixing conditioning fields. *J. opt. Soc. Am.* 56, 1775-1780.
- Boynton R. M. & Gordon J. (1965) Bezold-Brucke hue shift measured by color-naming technique. *J. opt. Soc. Am.* 55, 78-86.
- Boynton R. M., Ikeda M. & Stiles W. S. (1964) Interactions among chromatic mechanisms as inferred from positive and negative increment threshold. *Vision Res.* 4, 87-117.
- Brindley G. S. (1970) *Physiology of the retina and the visual pathway* (2nd ed). Baltimore, Md.: Williams & Wilkins.

- Brindley G. S., Du Croz J. J. & Rushton W. A. H. (1966) The flicker fusion frequency of the blue sensitive mechanism of color vision. *J. Physiol.* 183, 497-500.
- Broca A. & Sulzer D. (1902) La sensation lumineuse en fonction du temps. *J. Physiol. Path. Gen.* 4, 632-640.
- Brown J. L. (1965) Flicker and intermittent stimulation. In C. H. Graham (Ed.) *Vision and visual perception*. John Wiley & Sons, New York, 251-320.
- Chapanis A. (1944) Spectral saturation and its relations to color vision defects. *Journal of Experimental Psychology* 34, 24-44.
- deLange H. (1958) Research into the dynamic nature of the human fovea → cortex systems with intermittent and modulated light: II. Phase shift in brightness and delay in color perception. *J. opt. Soc. Am.* 48, 784-789.
- De Valois R. L. & De Valois K. K. (1975) Neural coding of color. In C.E. Carterette & M.P. Friedman (Eds), *Handbook of Perception*, Vol. V. Seeing, Pp. 117-166, Academic Press, New York.

- De Valois R. L., Abramov I. & Jacobs G. H. (1966) Analysis of response patterns of LGN cells. *J. opt. Soc. Am.* 56, 966-977.
- Enoch J. M. (1972) The two-color threshold technique of Stiles and derived component color mechanisms. In Jameson D. & Hurvich L. M. (Eds.), *Handbook of sensory physiology* VII/4. Pp. 537-567, New York:Springer-Verlag.
- Enroth-Cugell Ch. & Pinto L. H. (1972) Pure central responses from off-center cells and pure surround responses from on-center cells. *J. Physiol.* 220, 441-464.
- Enroth-Cugell Ch. & Lennie P. (1975) The control of retinal ganglion cell discharge by receptive field surrounds. *J. Physiol.* 247, 551-578.
- Finkelstein M. A. & Hood D. C. (1982) Opponent-color cells can influence detection of small, brief lights. *Vision Res.* 22, 89-95.
- Fitzpatrick D., Itoh K. & Diamond I. T. (1983) The laminar organization of the lateral geniculate body and the striate cortex in the squirrel monkey (*Saimiri sciureus*). *J. Neurosci.* 3, 673-702.

- Forsyth D. M. & Chapanis A. (1958) Counting repeated light flashes as a function of their number, their rate of presentation, and retinal location stimulated. *J. Exp. Psychol.* 56, 385-391.
- Friedman L. J., Yim M. H. & Pugh E. N. Jr. (1984) Temporal integration of the  $\pi 1/\pi 3$  pathway in normal and dichromatic vision. *Vision Res.* 24, 743-750.
- Gouras P. (1968) Identification of cone mechanisms in monkey ganglion cells. *J. Physiol.* 199, 533-547.
- Graham C. H. & Margaria A. (1935) Area and the intensity-time relation in peripheral retina. *Amer. J. Physiol.* 113, 299-305.
- Granit R. & Harper P. (1930) Comparative studies on the peripheral and central retina. II: Synaptic reactions in the eye. *Amer. J. Physiol.* 95, 211-227.
- Green D. G. (1969) Sinusoidal flicker characteristics of the color-sensitive mechanisms of the eye. *Vision Res.* 9, 591-601.
- Guth S. L. (1965) Luminance addition: General considerations

and some results at foveal threshold. J. opt. Soc. Am. 55, 718-722.

Guth S. L. (1967) Nonadditivity and inhibition among chromatic luminances at threshold. Vision Res. 7, 319-328.

Guth S. L., Alexander J. V., Chumbly J. I., Gillman C. B. & Patterson M. M. (1968) Factors affecting luminance additivity at threshold among normal and color-blind subjects and elaborations of a trichromatic-opponent colors theory. Vision Res. 8, 913-928.

Guth S. L., Donley N. J. & Marrocco R. T. (1969) On luminance additivity and related topics. Vision Res. 9, 537-575.

Hasegawa T. (1982) The appearance of colors produced by a minimum-energy stimulus and two pairs of fundamental colors. Color Res. Appl. 7, 201-204.

Hecht S. & Schlaer S. (1936) Intermittent stimulation by light. V. The relation between intensity and critical frequency for different parts of the spectrum. J. gen. Physiol. 19, 965-979.

Hecht S. & Smith E. L. (1936) Intermittent stimulation by

light. VI: Area and the relation between critical frequency and intensity. J gen. Physiol. 19, 979-991.

Herrick R. M. (1956) Foveal luminance discrimination as a function of the duration of the decrement or increment in luminance. J. comp. physiol. Psychol. 49, 437-443.

Higgins K. E. & Knoblauch k. (1977) Spatial Broca-Sulzer effect at brief stimulus duration. Vision Res. 17, 332-334.

Horton J. C. & Hubel D. H. (1981) Regular patchy distribution of cytochrome oxidase staining in primary visual cortex of macaque monkey. Nature 292, 762-764.

Hurvich L. M. (1981) Color vision. Sinauer, New York.

Hurvich L. M. & Jameson D. (1955) Some quantitative aspects of an opponent-colors theory: II. Brightness, saturation, and hue in normal and dichromatic vision. J. opt. Soc. Am. 45, 602-616.

Hurvich L. M. & Jameson D. (1957) An opponent-process theory of color vision. Psychol. Rev. 64, 385-404.

Ikeda M. (1963) Study of interrelations between mechanisms

- at thresholds. J. opt. Soc. Am. 53, 1305-1313.
- Ikeda M. (1964) Further use of the summation index for the study of color vision. J. opt. Soc. Am. 54, 89-94.
- Ikeda M. (1965) Temporal summation of positive and negative flashes in the visual system. J. opt. Soc. Am. 55, 1527-1534.
- Ingling C. R. Jr. & Martinez E. (1981) Stile's  $\pi 5$  mechanism : failure to show univariance is caused by opponent-channel input. J. opt. Soc. Am. 71, 1134-1137.
- Jameson D. & Hurvich L. M. (1955) Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. I. Chromatic responses and spectral saturation. J. opt. Soc. Am. 45, 546-552.
- Jameson D. & Hurvich L. M. (1962) Effect of exposure time on perceived color and color contrast. J. opt. Soc. Am. 52, 1326.
- Judd D. B. (1951) Basic correlates of the visual stimulus. In S. S. Stevens (Ed.), Handbook of experimental psychology. Pp. 811-867. John Wiley & Sons, New York.

- Kahneman D. & Norman J. (1964) The time-intensity relation in visual perception as a function of observer's task. *J. exp. Psychol.* 68, 215-220.
- Katz M. S. (1964) Brief flash brightness. *Vision Res.* 4, 361-373.
- Kawabata Y. (1990) Temporal integration properties for bichromatically mixed lights in color-anomalous vision. *Color Res. Appl.* 15, 156-166.
- Kawabata Y. & Aiba T. S. (1990) R/G and Y/B opponent-color mechanisms revealed in temporal integration for bichromatically mixed lights. *Color Res. Appl.* 15, 7-22.
- King-Smith P. E. & Carden D. (1976) Luminance and opponent-color contributions to visual detection and adaptation and to temporal and spatial integration. *J. opt. Soc. Am.* 66, 709-717.
- Kinny J. A. S. (1965) Effect of exposure time on induced color. *J. opt. Soc. Am.* 55, 731-736.
- Kirk D. B. (1985) The nature of the putative  $\pi 4$  mechanism of W. S. Stiles. A dissertation submitted in partial fulfill-

ment of the requirements for the Ph. D. (The University of Michigan).

Krauskopf J. & Mollon J. D. (1971) The independence of the temporal integration properties of individual chromatic mechanisms in the human eye. *J. Physiol.* 219, 611-623.

Kuffler S. W., Fitzhugh R. & Barlow H. B. (1957) Maintained activity in the cat's retina in light and darkness. *J. gen. Physiol.* 40, 683-702.

Leventhal A. G., Rodieck R. W. & Dreher B. (1981) Retinal ganglion cell classes in the old world monkey: Morphology and central projections. *Science* 213, 1139-1142.

Livingstone M. S. & Hubel D. H. (1984) Anatomy and physiology of a color system in the primate visual cortex. *J. Neurosci.* 4, 309-356.

Marks W. B., Dobbelle W. H. & MacNichol E. F. (1964) Visual pigments of single primate cones. *Science* 143, 1181-1182.

Michael C. R. (1979) Color-sensitive hypercomplex cells in monkey striate cortex. *J. Neurophysiol.* 42, 726-744.

Mitsuboshi M. & Mitsuboshi T. (1980) The specificity of interactions among the visual photopic mechanisms as revealed by spatial sensitization effects. *Jap. Psychol. Res.* 22, 197-206.

Mitsuboshi M. (1983) Sensitivity at the edge of a monochromatic luminance-step and the mechanisms of color vision. In J. D. Mollon & L. T. Sharpe (Eds.) *Colour Vision: Physiology and Psychophysics*, Pp.455-463, Academic Press, London.

三星 宗雄 (1984) Kirschmannの第3法則とそれに関連する諸問題. *基礎心理学研究* 3, 81-91.

三星 宗雄 (1986 a) 独立それとも相互作用:  $\pi$ メカニズムの忘れられた問題. *基礎心理学研究*, 5, 15-25.

三星 宗雄 (1986 b) Stilesの $\pi$ メカニズム: 複合システム. *心理学評論* 29, 391-410.

三星宗雄・長谷川 敬(1987) 色覚 川上元郎(編) 色彩の事典, Pp.170-247, 朝倉書店.

三星宗雄・木村英司(1989) Cffにおける加算性(未発表資料)

Mollon J. D. (1982) Color vision. *Ann. Rev. Psychol.* 33, 41-85.

Mollon J. D. & Polden P. G. (1975) Color illusion and evidence for interaction between cone mechanisms. *Nature* 258, 421-422.

Mollon J. D. & Polden P. G. (1980) A curiosity of light adaptation. *Nature* 286, 59-

Nagy A. L. (1979) Unique hues are not invariant with brief stimulus duration. *Vision Res.* 19, 1427-1432.

Nagy A. L. & Zacks J. L. (1977) The effect of psychophysical procedure and stimulus duration in the measurement of Bezold-Brucke hue shifts. *Vision Res.* 17, 193-200.

Nagy A. L. (1980) Short-flash Bezold-Brucke hue shifts. *Vision Res.* 20, 361-368.

Naka K. I. & Rushton W. A. H. (1966) S-potentials from colour units in the retina of fish (Cyprinidae). *J. Physiol.* 185, 536-555.

Perry V. H. & Cowey A. (1981) The morphological correlates

- of X- and Y-like retinal ganglion cells in the retina of monkeys. *Expl. Brain Res.* 43, 226-228.
- Polden P. G. & Mollon J. D. (1980) Reversed effect of adapting stimuli on visual sensitivity. *Proc. R. Soc. Lond. B* 210, 235-272.
- Pugh E. N. Jr. (1976) The nature of the  $\pi_1$  colour mechanism of W. S. Stiles. *J. Physiol.* 257, 713-747.
- Pugh E. N. Jr. & Larimer J. (1980) Test of the identity of the site of blue/yellow hue cancellation and the site of chromatic antagonism in the pathway. *Vision Res.* 20, 779-788.
- Pugh E. N. Jr. & Mollon J. D. (1979) A theory of the  $\pi_1$  and  $\pi_2$  colour mechanisms of Stiles. *Vision Res.* 19, 293-312.
- Regan D. & Tyler C. W. (1971) Temporal summation and its limit for wavelength changes: An analog of Bloch's law for color vision. *J. opt. Soc. Am.* 61, 1414-1421.
- Rouse, R. O. (1952) Color and the intensity-time relation. *J. opt. Soc. Am.* 42, 626-630.
- Rushton W. A. H. (1963) A cone pigment in the protanope.

J. Physiol. 168, 345-359.

Rushton W. A. H. (1965) A foveal pigment in the deuteranope.

J. Physiol. 176, 24-37.

Saunders R. M. (1975) The critical duration of temporal summation in the human central fovea. Vision Res. 15, 699-703.

Savoie R. E. (1973) Boezold-Brucke effect and visual non-linearity. J. opt. Soc. Am. 63, 1253-1261.

Siegel M. H. (1965) Color discrimination as a function of exposure time. J. opt. Soc. Am. 55, 566-568.

Sigel C. & Brousseau L. (1982) Pi-4: Adaptation of more than one class of cone. J. opt. Soc. Am. 72, 237-246.

Sigel C. & Pugh E. N. Jr. (1980) Stiles's  $\pi 5$  color mechanisms: Test of field displacement and field additivity hypothesis. J. opt. Soc. Am. 70, 71-81.

Sperling H. G. & Harwerth R. S. (1971) Red-green cone interactions in the increment-threshold spectral sensitivity of primates. Science 172, 180-172.

Sperling H. G. & Jolliffe C. L. (1965) Intensity-time relationship at threshold for spectral stimuli in human vision. J. opt. Soc. Am. 55, 191-199.

Sternheim C. E., Stromeyer C. F. & Khoo M. C. K. (1979) Visibility of chromatic flicker upon spectrally mixed adapting fields. Vision Res. 19, 175-183.

Stiles W. S. (1978) Mechanisms of colour vision. Academic Press, New York.

Stiles W. S. (1949) Increment thresholds and the mechanisms of colour vision. Documenta Ophthalmologica 3, 138-163.

Stiles W. S. (1961) Adaptation, chromatic adaptation, colour transformation. Anales d. t. Real Soc. Espanola d. Fis. y. Quim., 57, 149-175.

Stromeyer C. F. & Sternheim C. E. (1981) Visibility of red and green spatial patterns upon spectrally mixed adapting fields. Vision Res. 21, 397-407.

立花 政夫 色覚の神経機構 神経研究の進歩 特集 35巻, 3号 (印刷中).

- Tomita T., Kaneko A., Murakami M. & Pautler E. L. (1967)  
Spectral response curves of single cones in the carp.  
Vision Res. 7, 519-531.
- Uetsuki T. & Ikeda M. (1971) Adaptation and critical duration for Stiles  $\pi$  mechanisms. J. opt. Soc. Am. 61, 821-828.
- Valberg A. (1974) Color induction: Dependence on luminance, purity, and dominant or complementary wavelength of inducing stimuli. J. opt. Soc. Am. 64, 1531-1540.
- Wagner G. & Boynton R. M. (1972) Comparison of four methods of heterochromatic photometry. Journal of the Optical Society of America 62, 1508-1515.
- Wald G. (1964) The receptors of human color vision. Science 145, 1007-1016.
- Wandell B. A. & Pugh E. N. Jr. (1980 a) A field-additive pathway detects brief-duration, long-wavelength incremental flashes. Vision Res. 20, 613-624.
- Wandell B. A. & Pugh E. N. Jr. (1980 b) Detection of long-duration, long-wavelength incremental flashes by a chro-

matically-coded pathway. *Vision Res.* 20, 625-636.

White T. W. & Rinalducci E. J. (1981) Sensation length and equal brightness. *Vision Res.* 21, 603-605.

Whitten D. N. & Brown K. T. (1973) Slowed decay of the monkey's cone receptor potential by intense stimuli, and protection from this effect by light adaptation. *Vision Res.* 13, 1659-1667.

Wyszecki G. & Stiles W. S. (1982) *Color Science: Concepts and methods, quantitative data and formulas.* (2nd Edition), John Wiley & Sons, New York.

Zrenner E. (1983) *Neurophysiological Aspects of Color Vision in Primates.* Springer-Verlag, Berlin.

Zrenner E. & Gouras P. (1978) Retinal ganglion cells lose lose color opponency at high flicker rates. *Invest. Ophthalmol. Visual. Sci. (ARVO-Supple.)* 17, 130.

参考文献

第1章

三星宗雄 Stilesの $\pi$ メカニズム, 色の対比と色の同化 大山正・今井省吾・和気典二編, 新感覚+知覚心理学ハンドブック, 誠信書房(印刷中).

Mitsuboshi M. (1984) A temporal factor affecting field facilitation: Latency of the opponent-color system for depolarization. 基礎心理学研究 3, 9-15.

三星宗雄 (1984) Kirschmannの法則とそれに関連するいくつかの問題. 基礎心理学研究, 3, 81-94.

三星宗雄 (1986) 独立それとも相互作用:  $\pi$ メカニズムの忘れられた問題. 基礎心理学研究 5, 15-25.

三星宗雄 (1986) Stilesの $\pi$ メカニズム: 複合システム 心理学評論, 29, 391-410.

三星宗雄・長谷川 敬(1987) 色覚 川上元郎(編) 色彩の事典, Pp.170-247, 朝倉書店.

三星宗雄 (1988) 閾値の「超加算性」現象における一時間的要

因：青システム，神奈川大学心理・教育研究論集 6，123-134.

## 第 2 章

### 第 1 節（実験 1）

Mitsuboshi M., Kawabata Y. and Aiba T. S. (1987) Color-opponent characteristics revealed in temporal integration time. *Vision Res.* 27, 1197-1206.

### 第 2 節（実験 2）

Mitsuboshi M., Funakawa M., Kawabata Y. & Aiba T. S. (1987) Temporal integration in human vision and the opponent-color system. *Vision Res.* 27, 1187-1195.

### 第 3 節（実験 3）

Mitsuboshi M., Funakawa M., Kawabata Y. & Aiba T. S. (1987) Temporal integration in human vision and the opponent-color system. *Vision Res.* 27, 1187-1195.

川端康弘・三星宗雄（1985）人間の視覚系に於ける temporal integration と反対色メカニズム，日本TV学会技術報告 9，19(VVI 71-8)，13-18.

## 第 3 章

### 第 1 節（実験 4）

Mitsuboshi M. (1985) Test additivity at visual threshold as a function of exposure duration. Jap. Psychol. Res. 27, 89-96.

第 2 節 ( 実験 5 )

Mitsuboshi M. (1985) Two temporal phases, brightness-dependent and -independent, in the chromatic response elicited by a briefly-flashed monochromatic light: A preliminary report. Vision Res. 25, 1137-1145.

第 3 節 ( 実験 6 )

Mitsuboshi M. (1985) Two temporal phases, brightness-dependent and -independent, in the chromatic response elicited by a briefly-flashed monochromatic light: A preliminary report. Vision Res. 25, 1137-1145.

第 4 節 ( 実験 7 )

三星宗雄 (1985) Temporal sensitization: 方法, 結果, スペクトル飽和度. 日本TV学会技術報告 9, 19(VVI 71-7), 7-12.

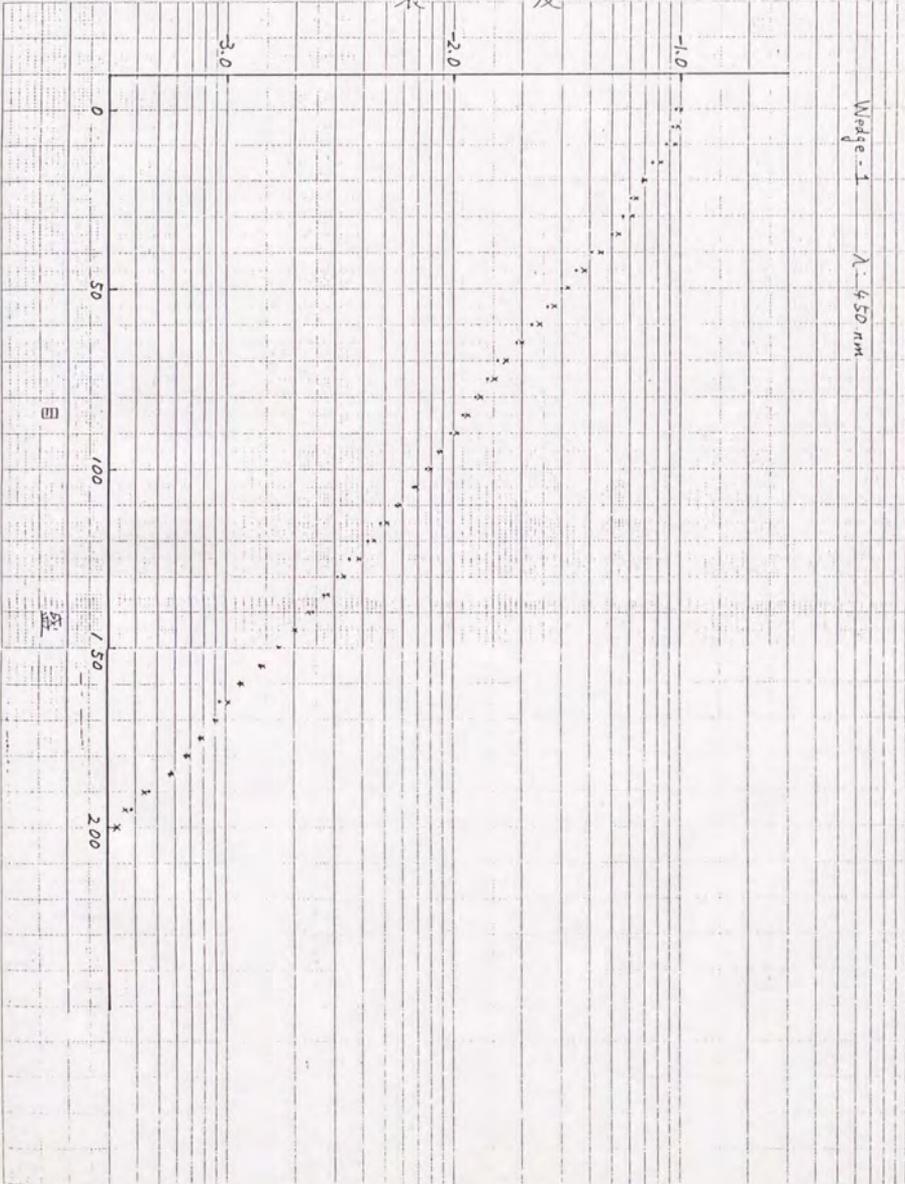


付 録

光学ウェッジの濃度の較正  
United Detector社 ラジオメータ Model 11A による

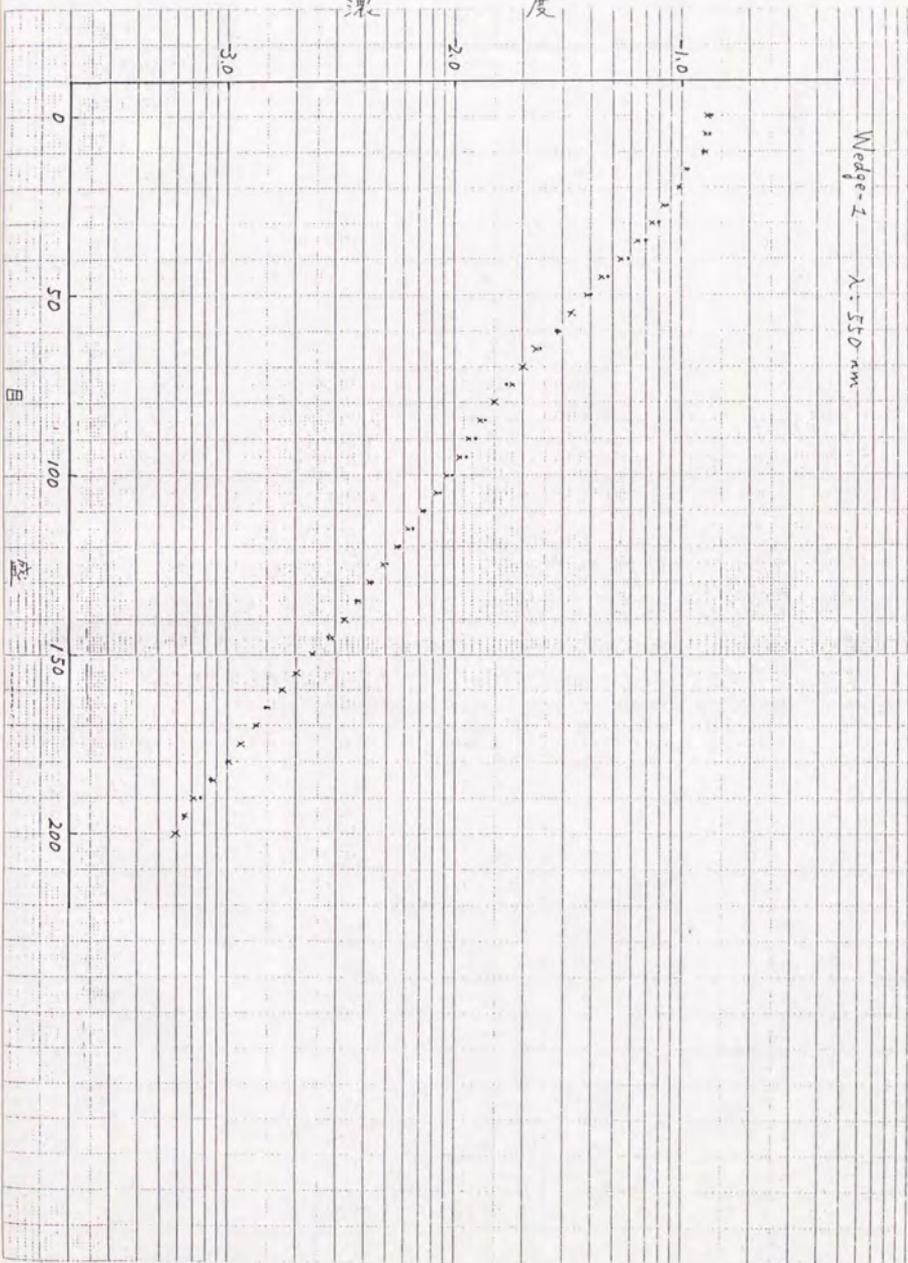
度 稜

Wedge - 1  
 $\lambda: 450 \text{ nm}$



濃 度

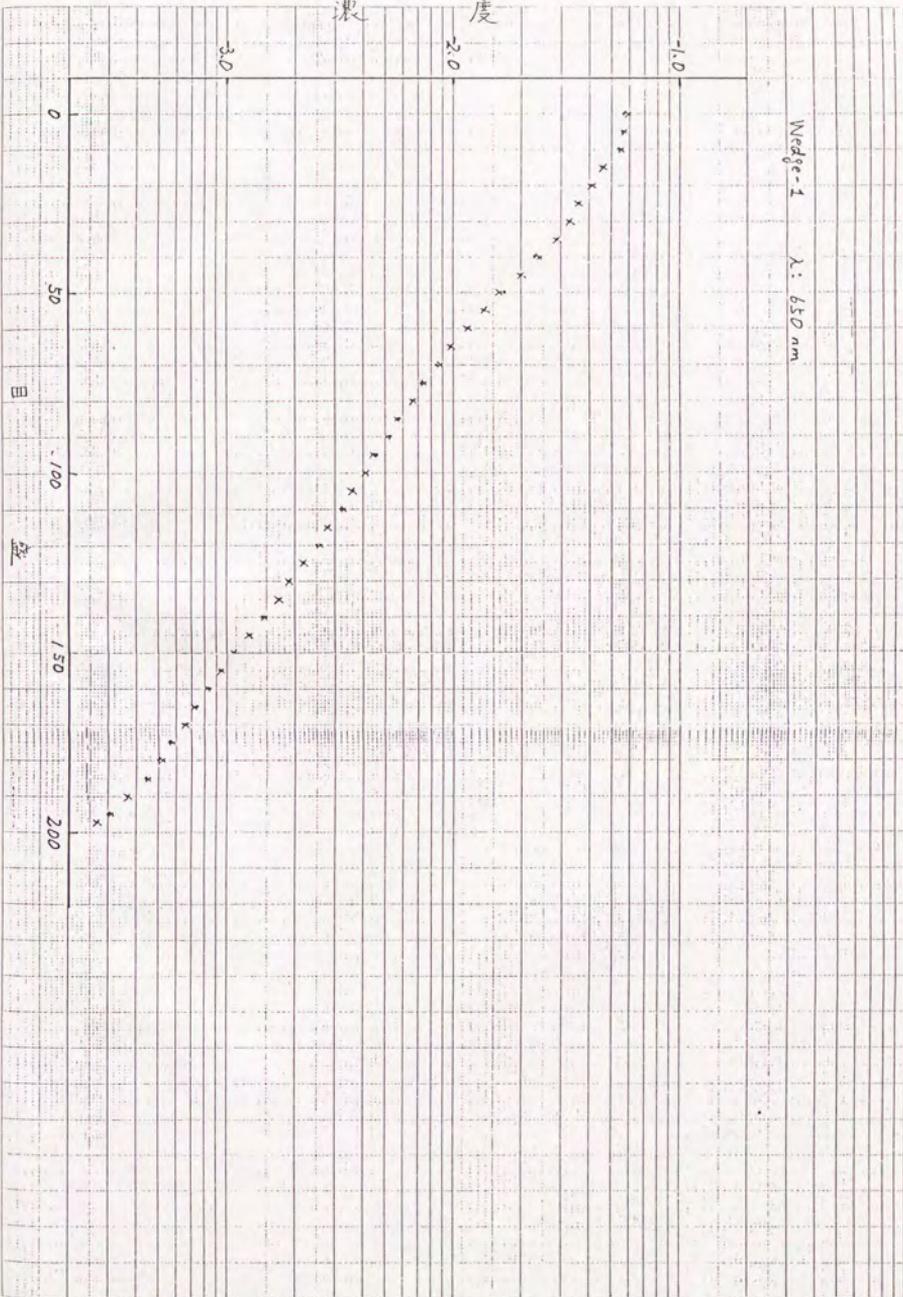
Wedge-1  $\lambda: 550 \text{ nm}$

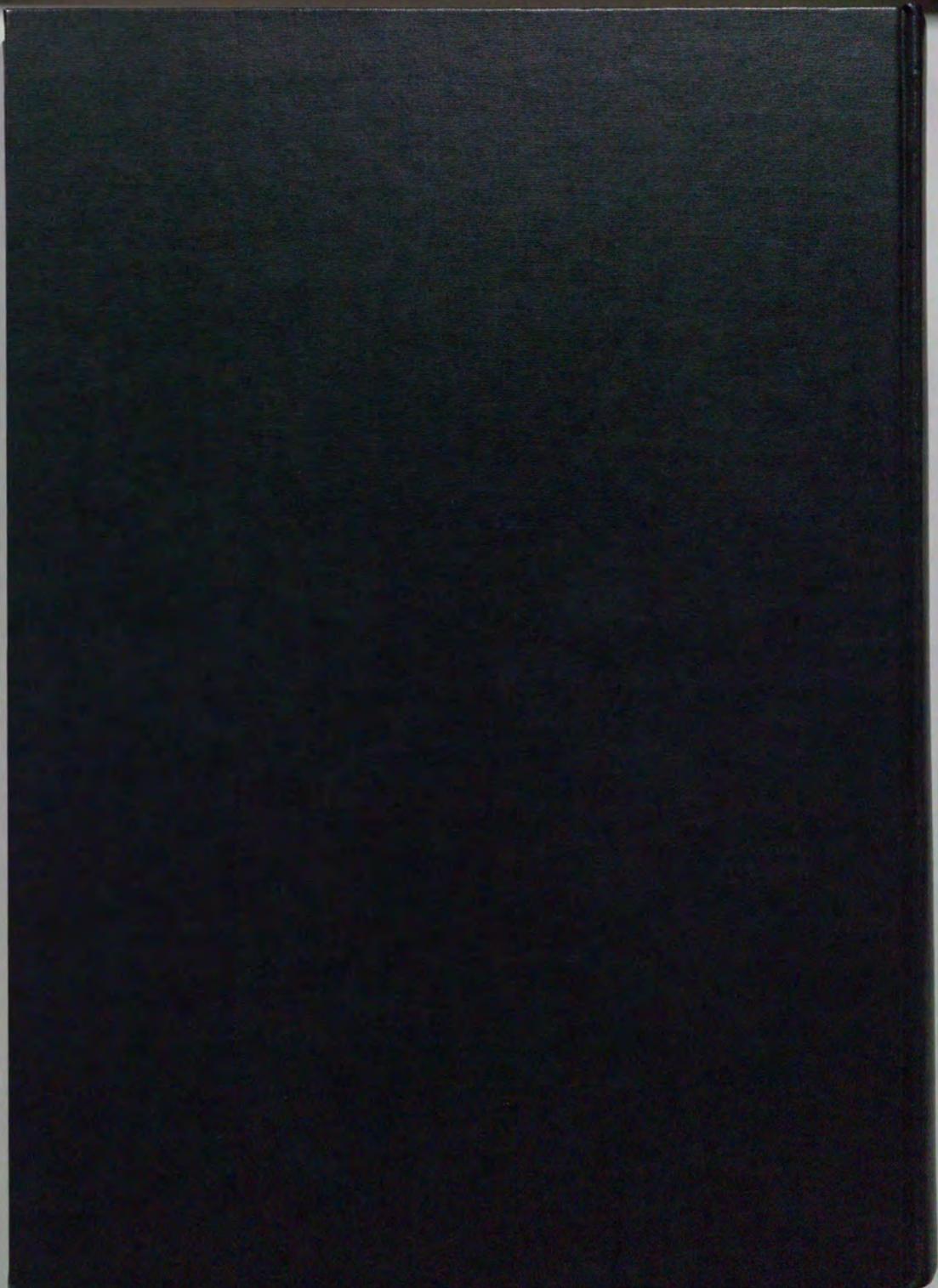


濃 度

Wedge-1

$\lambda: 650 \text{ nm}$





参 考 論 文

单色光の輝度ステップパターン上  
に於ける閾値の変化

三星 宗雄

## 参 考 論 文

## 単色光の輝度ステップパターン上

## に於ける閾値の変化

三星 宗雄

## 「単色光の輝度ステップパターン上に於ける閾値の変化」

### § 1 目的

主論文の議論の中で持続時間の長い刺激の検出は反対色メカニズムの順応又は抑制の影響を受け、一方持続時間の短い刺激の検出はその影響を免れるという仮定がしばしばなされてきた。Pugh(1976)の2サイト順応モデルの流れをくむWandell & Pugh (1980a; b)によれば、持続時間の短い刺激は単一変数の原理に従う錐体受容器( $\pi$ メカニズム)のみの順応に従って検出され、それは錐体受容器( $\pi$ メカニズム)自身が刺激の検出器であることと等価である。一方持続時間の長い刺激は反対色メカニズム(chromatically-coded pathway)によって検出される。

他方同じ2検出器を仮定するKing-Smith & Carden(1976)では、持続時間の短い刺激は(錐体受容器ではなく)輝度システム(luminance system)によって検出される。このように両モデルは持続時間の長い刺激の検出は反対色システムが行うと仮定する点では一致しているが、持続時間の短い刺激の検出については大きく異なる。

主論文では、時間加重の問題の範囲内で、いくつかの理由から後者のモデルに弱点があることを指摘した。この参考論文では、同じ閾値現象で時間加重以外の問題で、やはり後者のモデルが適合しないことを示す。

今図1(a)のような輝度ステップパターン上にテスト刺激を提示して、その明暗の境界線近傍を含むさまざまな部位で閾値を求めると、その典型的な結果は(b)ようになる。これは「エッジ効果(edge

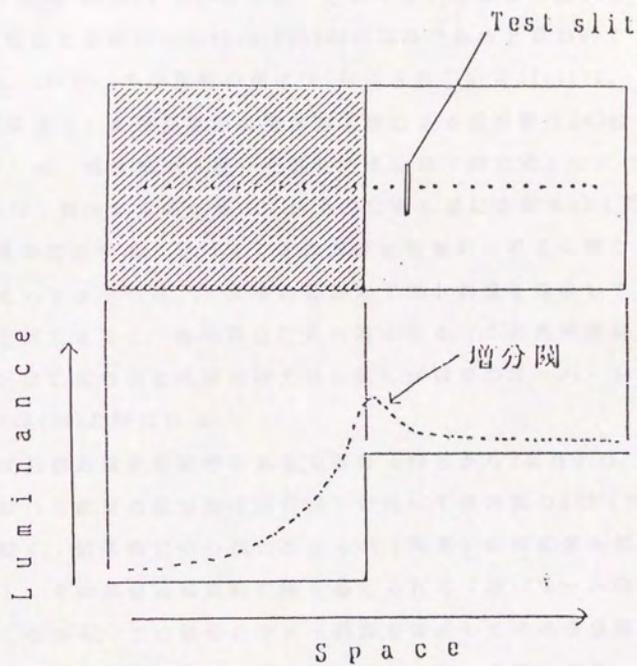


図1 輝度ステップパターン(a)とエッジ効果(b)

threshold effect 又は単にedge effect)」と呼ばれている(Lukas et al., 1980). もし刺激の輝度分布がステップ状ではなく, 例えばランプ状に変化する時, その変異点(帯)に知覚される明暗の帯はマッハの帯(Mach bands)と呼ばれる. このマッハの帯は所謂on中心, off周辺型の受容野(receptive field)の表れであると言われている(Thomas, 1965). その説明の例は図2に示されている(Frisby, 1979). (網膜上で)高輝度部側の境界線近傍にある受容野(e)の左から2番目は, 境界線から離れた部位の受容野(同左端)に比べて周囲部のoff(抑制)反応が弱く, 結果的に中心部におけるon(興奮)の反応量が増大する. 従って, その部位は知覚的に明るく感じられる(明るいマッハの帯). 又その部位にテスト刺激を提示してその増分閾を測定すると, 他の部位に比べ高くなる. この高輝度部側の境界線近傍に見られる閾値の増大はしばしば閾値のオーバーシュート(overshoot)と呼ばれる.

一方低輝度部側の境界線近傍にある受容野(同右から2番目)は, 境界線から離れた部位の受容野(同右端)に比べて周囲部のoff(抑制)反応が強く, 結果的に中心部におけるon(興奮)の反応量を低める. 従って, その部位は知覚的に暗く感じられる(暗いマッハの帯). しかしながら, この部位にテスト刺激を提示してその増分閾を測定すると, 他の部位に比べ(低くならず)むしろ高くなる. この低輝度部側の境界線近傍に見られる閾値の増大は, 眼球内散乱光(stray light)によって実際には物理的にも閾値曲線に近い輝度分布をしているためとされる(暗いマッハの帯は, それにもかかわらず, 知覚される).

エッジ効果も原理的にこのマッハの帯の現象と同じまたは似たメ

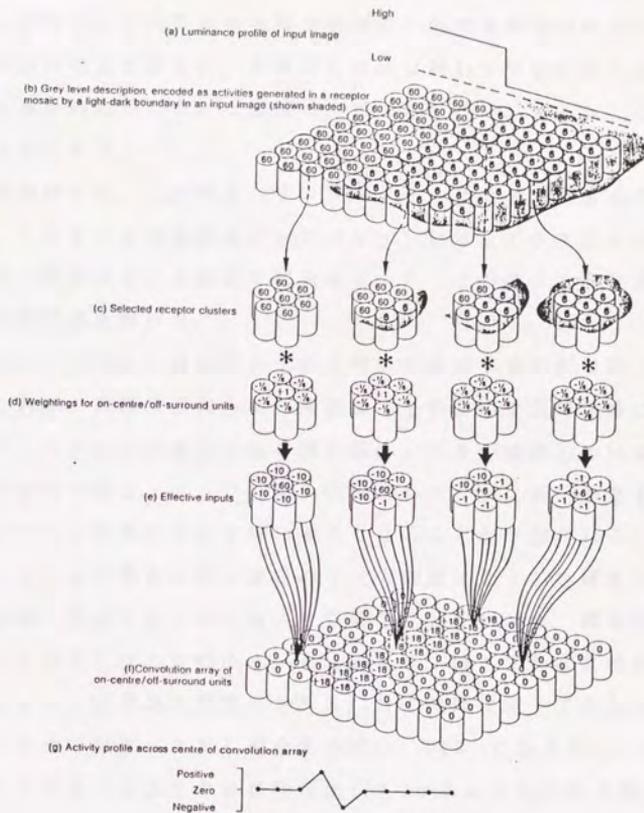


図2 on中心, off周辺型の受容野によるマッハの帯現象の説明  
 (a)が物理的な輝度分布, (g)が感覚的な明るさの分布を示す。  
 (d)が上記受容野の構造を示す (Frisby, 1979)。

カニズムがはたらいっていると考えられる（三星，1981）。エッジ効果は原則として境界線の高輝度部側及び低輝度部側の両方に見られる閾値の増大を指すが，本論文では特に断わりがない限り高輝度部側の境界線近傍における閾値の上昇（オーバーシュート）だけを指すことにする。

本実験では，この輝度ステップパターンとテスト刺激を単色光とし，さまざまな波長のステップパターンに対してさまざまな波長のテスト刺激を組み合わせて閾値を求めた。この時テスト刺激には短い持続時間を用いた。

もしこの短い持続時間のテスト刺激を検出するのが輝度システムであれば，高輝度部側の境界線近傍（上の型の受容野構造によって輝度システムの活動又はある種の順応レベルが増大している）における閾値の増大（エッジ効果）は輝度システムに高い感度を持つ波長のテスト刺激に対して特に大きくなることが予想される。逆に輝度システムに感度の低い波長のテスト刺激はそうした輝度システムの活動（順応）レベルには余り影響を受けないから，閾値の増大（エッジ効果）は比較的小さいと思われる。換言すれば高輝度部側におけるエッジ効果は輝度システムの分光感度に従って変化することになる。輝度システムの分光感度は  $V(\lambda)$  であるから，得られるエッジ効果の大きさの波長特性は  $V(\lambda)$  か又はそれに似た特性となる。

輝度ステップパターンの波長が変わっても，検出するシステムが輝度システムである限り，エッジ効果の波長特性は不変であるに違いない。その時ステップパターンの輝度が変わらなければ以前の波長の時と全く同じ結果となり，一方その時ステップパターンの輝度

が変われば、エッジ効果の大きさに変化はあるもののその波長特性は依然として変わらないことが予想される。というのはステップパターンの波長／輝度に変化しても、それはただ唯一の検出システムである輝度システムの活動（順応）状態を変化させるのみだからである。

一方もしステップパターンの波長を変えた時テスト刺激との波長の組合せによってエッジ効果の波長特性が変化すれば、即ち $V(\lambda)$ 特性が崩れるなら、それはテスト刺激を検出するシステムが1つではないことを意味する。その時輝度システムとそれに加えて何らかのあるシステムを考えることは不自然であるから、輝度システムとは全く別のいくつかのシステムを仮定せざるを得ないと思われる。そうしたシステムは錐体受容器であると仮定するのが普通であろう。

## § 2 方法

### 2・1 装置

通常の3光路型マックスウェル視光学系装置を用いた。光源は150 Wハロゲンランプであった。輝度ステップパターンは同形に切り抜き、下半分を中性ゼラチンフィルタ（濃度1.64）でおおったフィールドストップによって得た。パターンの中央の境界線（ゼラチンフィルタの切り口）を除く4つのエッジはカミソリの刃で作し、イメージの明瞭度を高めた。又単色のテスト刺激及びステップパターンは全て干渉フィルタを通して得た（半値幅 $<15\text{nm}$ ）。

## 2・2 刺激パターン

図3は被験者からみた刺激パターンである。ステップパターン(SP)は $8^{\circ} \times 4^{\circ}$ の大きさで、高輝度部(上部)と低輝度部(下部)の輝度比は対数で1.64である。このSPは定常的に提示された。SPの波長には620, 528, 440nmの3波長が用いられた。その時の高輝度部の輝度はそれぞれ226, 248, 357cd/m<sup>2</sup>であった<sup>1)</sup>。

テストスリット(TS)は持続時間が20msecであり、SPの高輝度部側と低輝度部側のそれぞれ9箇所<sup>2)</sup>に提示された。提示部位はテストスリット用のフィールドストップが備え付けられている微動位置調整装置を用いて変えた。主実験ではTSの大きさは $5' \times 1.76^{\circ}$ 、又補足的な実験2では $5' \times 52.8'$ とした。TSには626, 529, 439nmの3波長を用いた。

又注視点用の赤色の小光点を提示するフィールドストップはテストスリットのフィールドストップと連動して動くように作られており、従ってテストスリットはステップパターンのどの位置にあろうとも常に2つの注視点の中間に提示された。

## 2・3 被験者

MM(著者本人)及びTMの2名が参加した。二人共色覚及び視力は正常であった。

---

1)この輝度の相違は用いられた3波長に対してエッジ効果の大きさがほぼ同じくらいになるようにしたためである。

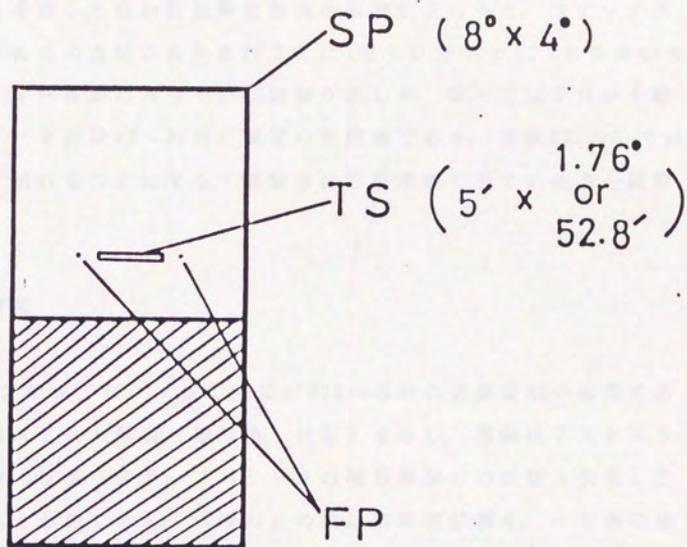


図3 被験者から見た刺激パターン

## 2・4 手続き

約10分間の暗順応後実験を開始した。実験1では各被験者は調整法を用いてテストスリットに対する閾値を求めた。閾値の各測定部位（テストスリットの提示部位）で6回測定を行い、その順序はステップパターンの高輝度部側及び低輝度部側ごとにランダム化し、順応の影響を考慮して最初に低輝度部側から測定を行った。ステップ及びテスト波長の各組み合わせ条件ごとに1セッションとし、各条件のセッションを何日かに渡って2~5回繰り返した。従って以下に示す結果の各データ点は12~30回の測定の平均値である。実験2についてはその項で触れることにする。被験者は右眼単眼で全ての刺激を観察した。

## §3 結果

図4はステップパターンの波長が620nmの時の被験者MMの結果である。縦軸はテスト閾値（相対値、対数）を示し、横軸はテストスリットの提示位置をステップパターンの境界線からの距離（視角）として示したものである。横軸の正の値は高輝度部側を、一方負の値は低輝度部側を表わし、0は境界線を表わしている。パラメータはテスト波長である。又各曲線は見易いように適当に上下にずらしてある。各データ点の短い縦棒はそれぞれ $\pm 1S.D.$ の大きさを示す。

図からわかるように、いずれのテスト波長に対してもエッジ効果（高・低輝度部側境界線近傍における閾値の上昇）が見られた。しかし高輝度部側境界線におけるエッジ効果は明らかにテスト波長が

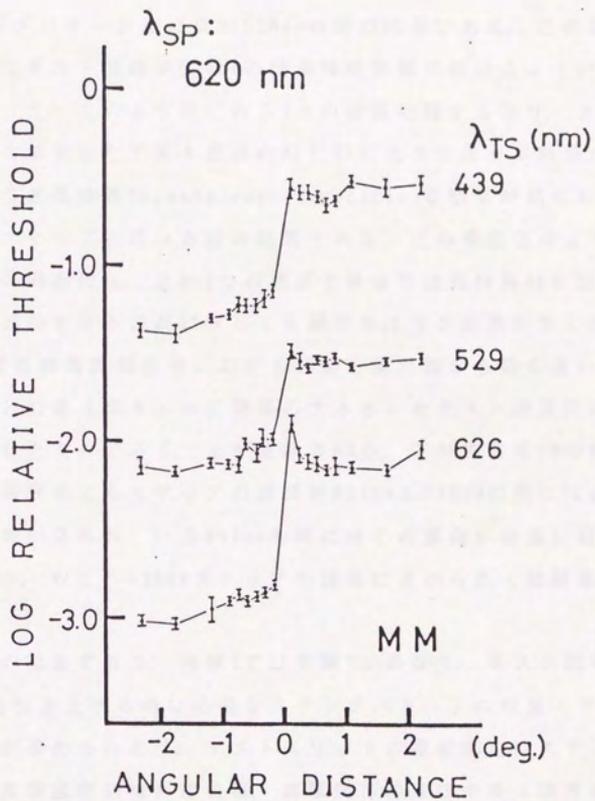


図4 エッジ効果 620nmステップパターン, 被験者MM

626nmの時大きかった。一方低輝度部側境界線におけるエッジ効果はテスト波長によって大きな差は見られなかった。

図5はステップパターンの波長が528nmの時の結果である。この場合には明らかにテスト波長が529nmの時高輝度部側におけるエッジ効果は大きくなった。このようにこれら2つの波長に関する限り、ステップパターンと類似したテスト波長の時に特に大きなエッジ効果が得られるという波長特異的(wavelength-specific)な結果が見られた。

図6は440nmステップを用いた時の結果である。この青紫色のステップパターンの場合には、上の2つの波長と異なり波長特異的な結果は見られず、どのテスト波長に対しても顕著なエッジ効果が生じた。

図7は高輝度部側境界線近傍における閾値と境界線から最も遠い3点の平均閾値との差(即ちエッジ効果の大きさ)をテスト波長に対してプロットしたものである。上が被験者MMの、下が被験者TMの結果である。両被験者ともステップの波長が620nmと528nmの時には波長特異的な結果が見られ、一方440nmの時にはその傾向が非常に弱い(被験者MM)か、むしろ528nmステップの結果に近かった(被験者TM)。

図8は実験2の結果である。実験2では実験1と異なり、テスト閾を0.88 log 単位引き上げるのに必要なステップパターンの強度(フィールド強度)が求められた<sup>2)</sup>。テストスリットの提示部位はステップパターンの高輝度部側境界線近傍、高輝度部のほぼ中央(境界線

---

2) 0.88log単位という値は中途半端な値であるが、用いたNDフィルタ(名目濃度1.0)の実測濃度の値であった。ちなみにStilesのπメカニズムの研究では1.0log単位であった(Stiles, 1978)。

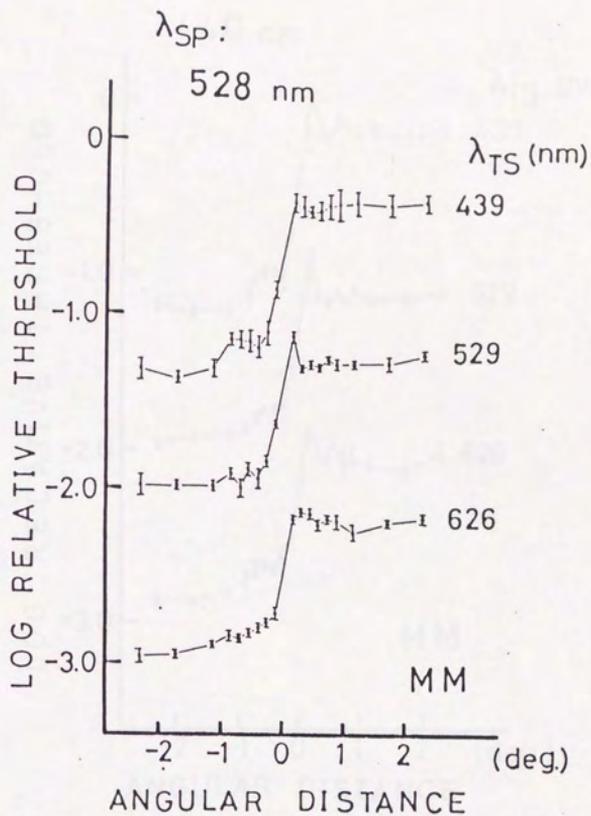


図5 エッジ効果 528nmステップパターン, 被験者MM

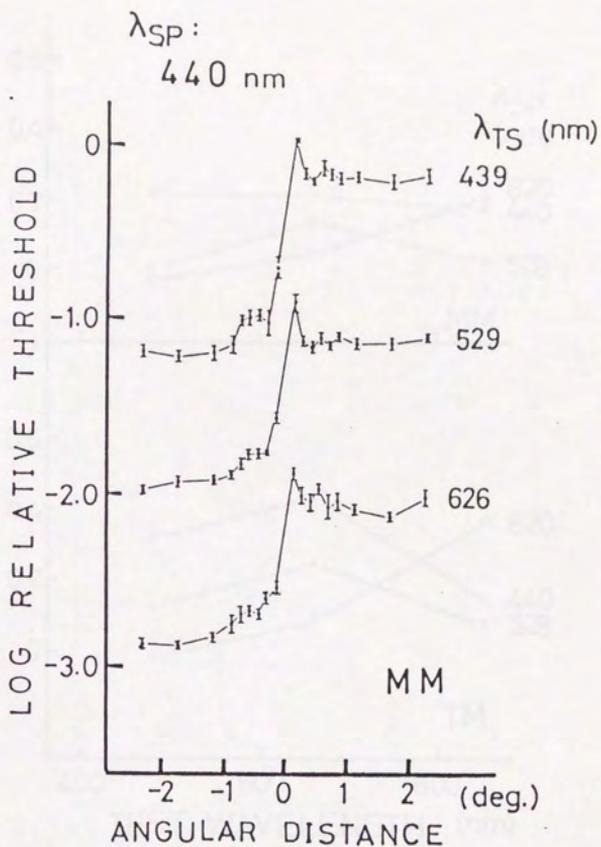


図6 エッジ効果 440nmステップパターン, 被験者MM

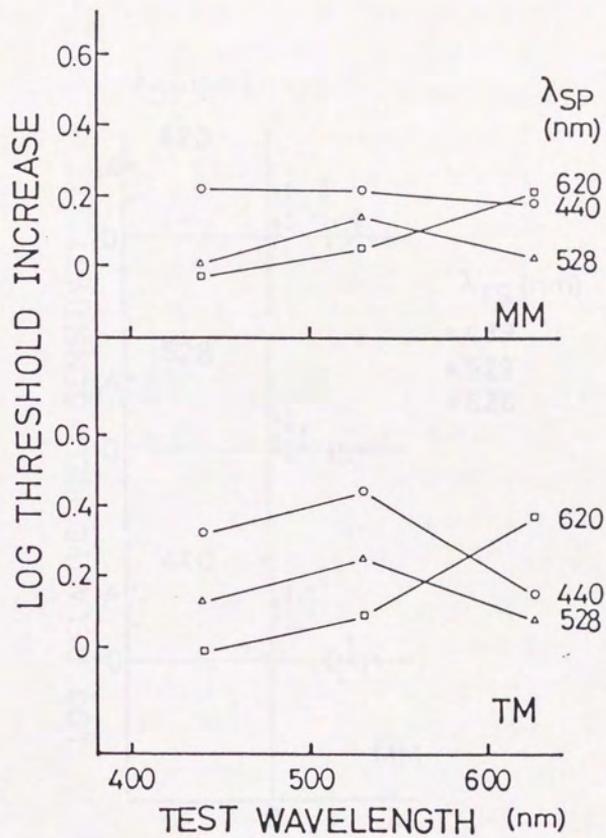


図7 エッジ効果の大きさ 被験者MM(上)及び被験者TM(下)の結果

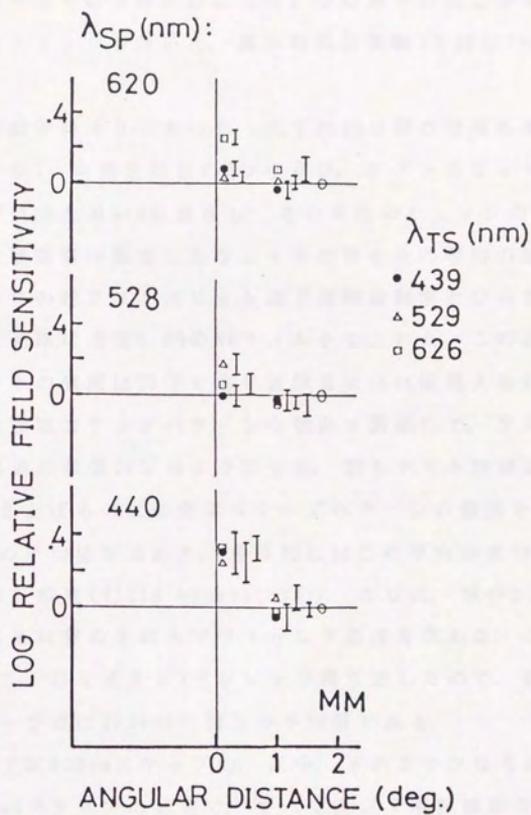


図8 エッジ効果のフィールド感度 被験者MM

から $52.8^\circ$ 上の位置)及び遠点(同 $1.64^\circ$ 上の位置)の3点であった。又テストスリットはその全体がほぼ完全に中心窩中心部に落ちる $5^\circ \times 52.8^\circ$ の短いスリットを用いた。提示時間は実験1と同じ $20\text{msec}$ であった。

実験手続きは以下の通りであった。先ず約10分間の暗順応後、ステップパターンの3つの測定部位の1つを選び、テストスリットの閾値を求めた(調整法を用い6回測定し、その平均のウェッジの値を求めた)。次に今被験者が調整したウェッジの値をその平均の値にセットし(従ってこの時テストスリットは丁度閾値強度となった)、テストスリット光路に濃度0.88のNDフィルタを入れた。この状態ではテストスリットの強度は閾下であり被験者にはほぼ見えない。その後被験者は今度はステップパターンの強度を調節して、テストスリットが再び閾値の状態になるようにした。即ちテスト閾値を0.88 log単位だけ引き上げるのに必要なステップパターンの強度を求めた。6回測定し、その平均値を求めた。最終的にはこの平均強度の逆数を求め、フィールド感度(field sensitivity)とした。他の2つの測定部位についても同様の手続きでフィールド感度を求めた。これを1セッションとし、日を変えて4セッション繰り返したので、図8のグラフの1つのデータ点は計24回の測定の平均値である。

図中上のグラフは $620\text{nm}$ ステップの、又中、下のグラフはそれぞれ $528\text{nm}$ 及び $440\text{nm}$ ステップの結果で、すべて遠点(境界線から $1.64^\circ$ の位置)における感度が0になるように他の2点における値が調整されている。

図から明らかなように、ステップパターンが $528\text{nm}$ と $620\text{nm}$ の時には、それぞれ似た波長のテストスリットに対して特異的に境界線

における感度が増大した<sup>3)</sup>。即ち波長特異的なエッジ効果が見られた。一方440nmステップの場合には実験1と同様に波長特異的な結果は見られず、どのテスト波長に対しても顕著なエッジ効果が見られた。

#### § 4 考察

本実験の結果は短い持続時間を検出するのが輝度システムではないことを示唆している。620nmステップと528nmステップの場合に見られた波長特異的な結果及び440nmステップにみられた非波長特異的な結果のどちらも「輝度システム仮説」に対して否定的な結果である。このような波長特性はやはり同じようなon中心、off周辺型の受容野の表れとされているspatial sensitization現象（背景刺激の面積が増大するにつれて、その上に於けるテスト刺激の閾値が低下する現象）でも得られている（Mitsuboshi & Mitsuboshi, 1980）。

620nmステップ及び528nmステップの場合に見られた波長特異的な結果はもう一つの仮説「錐体受容器仮説」に有利なように思われる。

- 3) このフィールド感度の増大はテスト閾を上昇させるのに、より少ないステップパターン（フィールド）の強度で十分であったことを意味する。即ちそれだけフィールドによって引き起こされる神経興奮が大きいのである。従ってそうした部位でテスト刺激の閾値を求めれば、閾値は高くなるであろう。これは実験1で得られた結果である。従って実験2におけるフィールド感度の上昇は実験1のテスト閾の上昇と意味するところは同じである。

換言すれば「波長特異性」は「メカニズム特異性」＝「錐体受容器特異性」と結び付く。実験1の結果に即して解釈すれば、on中心、off周辺型の受容野構造から生じる側抑制（の解除）によって境界線近傍におけるR錐体（620nmステップの場合）又はG錐体（528nmステップの場合）の順応（興奮又は活動）レベルが上昇し、従ってその上に提示された赤（626nm）又は緑（529nm）のテストスリットの閾値が上昇した、ということになる。

上の説明を成立させる1つの可能性は、刺激を検出する受容野は輝度情報（輝度差）だけを伝達する非反対色型（spectrally non-opponent type又はBI-wh型； DeValois & DeValois, 1975あるいはphasic type； Gouras, 1968）ではなく、輝度情報だけでなく色情報（色差）をも伝達する反対色型（spectrally opponent typeあるいはtonic type）の受容野であると考えられることである。問題がないわけではないが（例えばその応答のtonic性）、その分布が中心窩で特に優位なことを考慮に入れるなら（本実験ではテスト刺激は全て中心窩に落ちる）、不自然な仮定ではない。

図示すれば図9(a,b)のようになろう。そこでは赤色（620nm）のステップパターンによっては中心+Rの受容野が、一方緑色（528nm）のステップパターンによっては中心+Gの受容野が主に刺激を受けると仮定される。もちろんそうした異なった型の受容野は、図では空間的に離れて示されているが、実際には網膜上で大きくオーバーラップしていると考えられる。

ここで重要なことはこの受容野構造（on中心，off周辺）はどこまでも明るさ情報（刺激に輝度差が存在する場合）に関してであることである。こうしたon中心，off周辺の受容野構造は色情報（刺激に

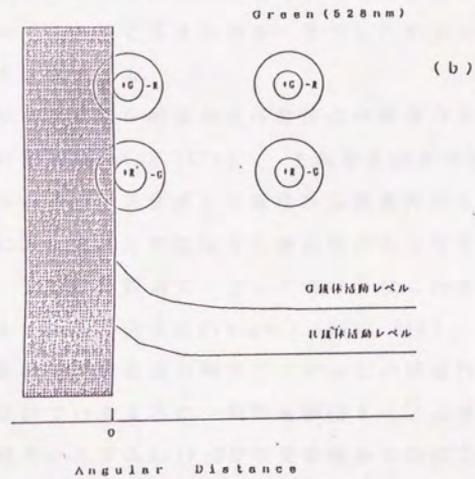
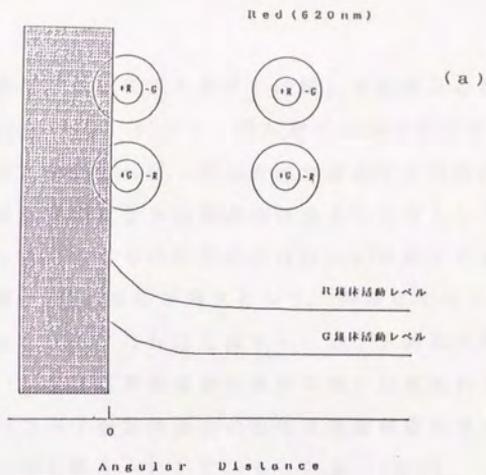


図9 波長特異的なエッジ効果を説明する受容野構造 620nmステップの場合(a)及び528nmステップの場合(b)

輝度差がなく、色度差だけが存在する場合)に関しては成立しない (DeValois & DeValois, 1975, P134)。即ち例えば+R-G型の受容野はもし提示刺激に輝度差がなければ、中心領域が赤色でかつ周辺領域も赤色の時、換言すれば均質な赤色刺激の時最大の反応をし、かつ受容野のどの部位においてもその応答の方向性(on)は同じである。

一方均質な緑色刺激の時off反応が最大となり、同様にその方向性は受容野の部位に依存しない。これは上記マッハバンド現象に関して、明るさのマッハバンド(境界線近傍の明暗の縞)は見られるがいわゆる色のマッハバンド(境界線近傍の色相又は飽和度の増大・減少)が見られないことと軌を一にしている(三星, 1986)。

従って上記のような型の受容野が成立するのは明るさ情報を伝達するチャンネルにおいてであると考えられる。そうしたチャンネルは他にもなく輝度システムである。

一方輝度システムはさまざまな研究からR錐体とG錐体の入力を受けていると考えられる(Boynton, 1979)。それをそのまま受容野構造で表現すれば、中心領域にR錐体とG錐体から興奮性の入力を受け、一方周辺領域にはR錐体とG錐体から抑制性の入力を受けるという構造になろう。生理学の領域でこうした受容野はこれまで報告されていないこともないが(例えばZrenner, 1983, P40)、本実験の結果から上記の型の受容野構造と輝度システムとの関連性を考えるなら、図10に示されているように、刺激を検出する(心理物理学的概念としての)輝度システムは+R-G型の受容野からの出力と+G-R型の受容野からの出力を同時に入力すると仮定した方が妥当であろう。

このように同じ明るさ(輝度)情報を伝達する、又はそうした情

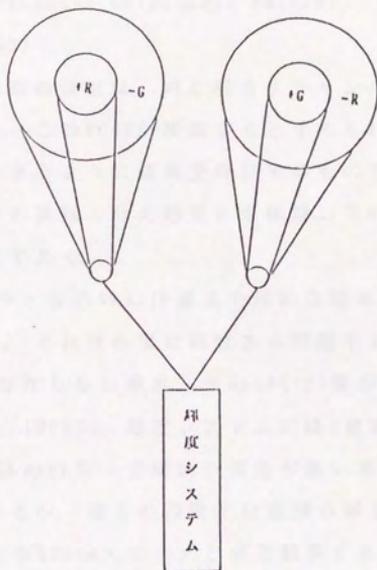


図10 本実験の結果を説明するチャンネル前明るさ経路  
(P C B P) (Mitsubishi, 1983).

報を検出するチャンネルの中にあつて輝度システムという、 $V(\lambda)$ の分光感度曲線を持つ単一システムより以前の段階に、上の型の受容野構造を成す、各錐体からの出力がまだ統合(integrate)されずに残っている段階を仮定すれば説明がつく。そうした過程はチャンネル前明るさ経路(pre-channel brightness pathway, PCBP)と呼ばれた(Mitsuboshi, 1983)

短い持続時間の刺激の検出は、同じ明るさチャンネルの中でも輝度システムではなく、このPCBPが検出すると考えられるのである。このPCBPは以上見てきたように錐体受容器そのものではないが、少くとも各錐体受容器の機能(分光感度)を保持している点ではそれに限りなく近い過程である。

440nmステップパターンの時には波長特異的な結果が見られなかった(特に被験者MM)。これは非常に興味ある問題である。中心窩の中心部にはB錐体が存在しない事実、中心+B(-Y)型の受容野は非常に少い事実(Zrenner, 1983)、輝度システムにはB錐体が入力していない可能性又はB錐体の時間・空間的分解能が悪い事実などが関連しているように思われるが、現在の段階では推測の域を出ない。ただし被験者TMではむしろ528nmステップと似た結果であった。従つて440nmステップに対して最も感度が高いのはG錐体であった可能性もある。しかしながらこの問題は本論文の主テーマと直接関連してはいないと思われるので、その議論は他で行うことにしたい。

## § 5 引用文献

Boynton R. M. (1979) Human Color Vision. Holt, Rinehart &

Winston, New York.

De Valois R. L. & De Valois K. K. (1975) Neural coding of color. In C. E. Carterette & M. P. Friedman (Eds), Handbook of Perception, Vol. V. Seeing, Academic Press, New York, Pp. 117-166.

Gouras P. (1968) Identification of cone mechanisms in monkey ganglion cells. J. Physiol. 199, 533-547.

Frisby J. P. (1979) Seeing: Illusion, Brain and Mind. Oxford Univ. Press, Oxford.

Lukas F.X., Tulunay-Keesey U. and Limb J.O. (1980) Thresholds at luminance edges under stabilized viewing conditions. J. opt. Soc. Am. 70, 418-422.

King-Smith P. E. & Carden D. (1976) Luminance and opponent-color contributions to visual detection and adaptation and to temporal and spatial integration. J. opt. Soc. Am. 66, 709-717.

三星 宗雄 (1981) Mach bands: その見えと心理物理学的測定 日本TV学会技術報告 VVI46, 29-34.

Mitsuboshi M.(1983) Sensitivity at the edge of a monochromatic luminance-step and the mechanisms of color vision. In Mollon J. D. & Sharpe L. T.(Eds.) Colour Vision: Physiology and Psychophysics, 455-463. Academic Press, London.

三星 宗雄(1986) Kirschmannの法則とそれに関連するいくつかの問題 基礎心理学研究 3, 2, 81-94。

Mitsuboshi M. & Mitsuboshi T.(1980) The specificity of interactions among the visual photopic mechanisms as revealed by spatial sensitization effects. Japanese Psychological Res. 22, 197-206.

Pugh E. N. Jr.(1976) The nature of the  $\pi_1$  colour mechanism of W. S. Stiles. J. Physiol. 257, 713-747.

Stiles W. S.(1978) Mechanisms of Colour Vision. Academic press, New York.

Thomas J. P.(1965) Threshold measurements of Mach bands. J. opt. Soc. Am. 55, 521-524.

Wandell B. A. & Pugh E. N. Jr.(1980 a) A field-additive pathway detects brief-duration, long-wavelength incremental flashes. Vision Res. 20, 613-624. Vision Res. 20,

625-636.

Wandell B. A. & Pugh E. N. Jr. (1980 b) Detection of long-duration, long-wavelength incremental flashes by a chromatically-coded pathway. *Vision Res.* 20, 625-636.

Zrenner E. (1983) *Neurophysiological Aspects of Color Vision in Primates*. Springer-Verlag, Berlin.

## § 6 要約

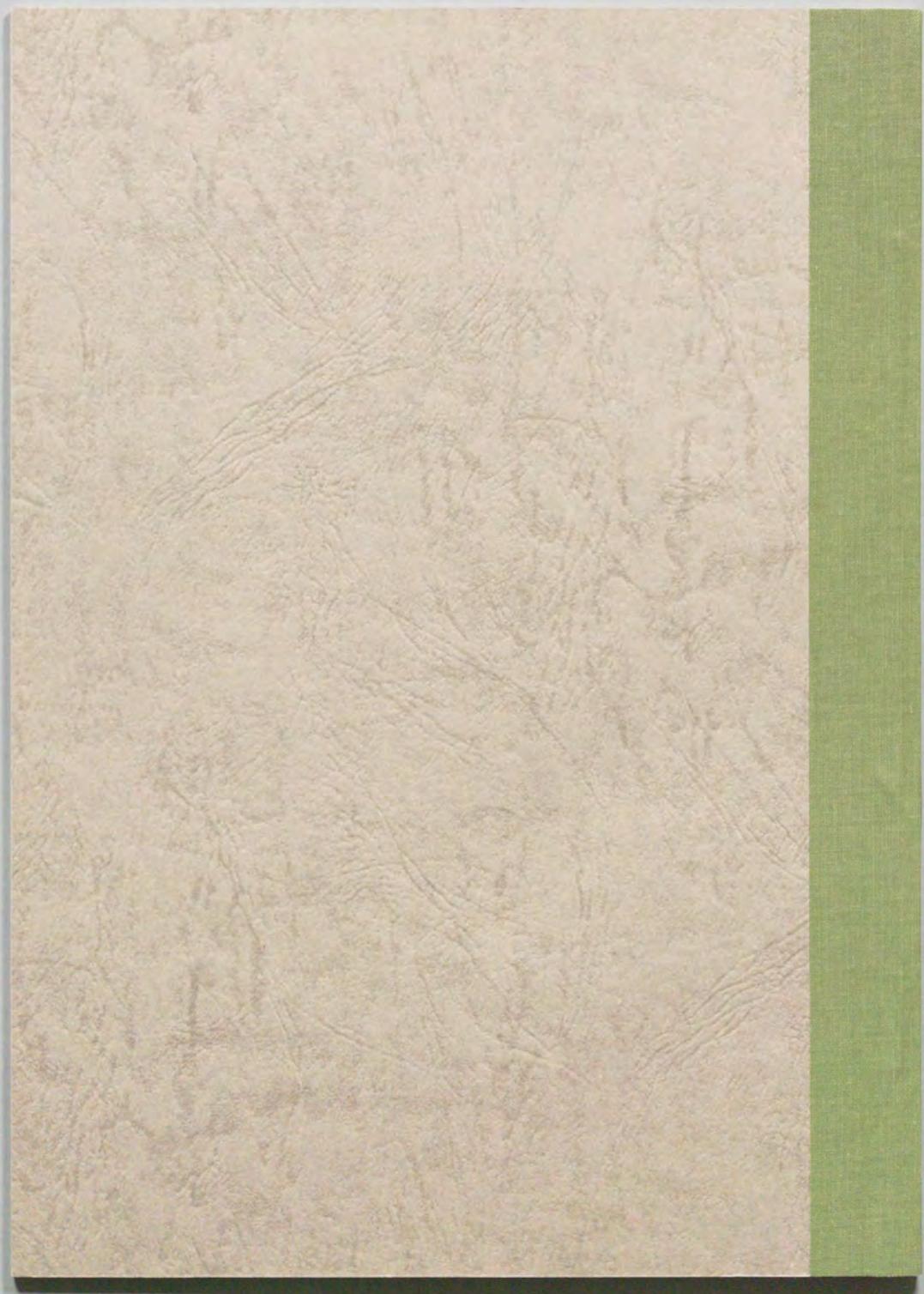
(1) 単色光から成る輝度ステップパターン上のさまざまな部位に単色光のテストスリット (持続時間 20 msec) を提示し, その増分閾を求めた.

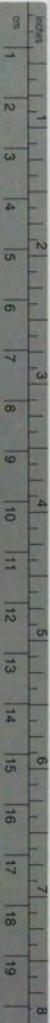
(2) ステップパターンの境界線の高輝度部側及び低輝度部側のどちらの近傍 (エッジ) に於いても, そのテスト閾値はそれぞれ境界線から離れた部位に於ける閾値よりも高かった (エッジ効果).

(3) しかしその閾値の増大は, ステップパターンの波長と近い波長のテストスリットの時最も顕著であった (波長特異性).

(4) ただし 440 nm ステップの場合にはテスト波長の如何に関わらず大きなエッジ効果が見られた.

(5) この結果は輝度システムが短い持続時間の刺激を検出するという仮説に否定的であると解釈された.





# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue	Cyan	Green	Yellow	Red	Magenta	White	3/Color	Black
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27

# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A	1	2	3	4	5	6	M	8	9	10	11	12	13	14	15	B	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39