

平成 12 年度
学士学位論文

前刺激による色順応後の色弁別

**Color discrimination under different chromatic
adaptations by pre-presented stimuli.**

101438 深田 良尚

指導教員 篠森 敬三

2001 年 2 月 5 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

前刺激による色順応後の色弁別

深田 良尚

錐体レベルでの順応と錐体以降のレベルの反対色チャンネルでの順応を分離し、反対色チャンネルが赤、緑、青、黄チャンネルの独立なものであるか、あるいは、赤-緑、青-黄という2つの組み合わせられた反対色チャンネルであるかどうかを検討するために、時間的に白と色とを交替する刺激と、時間的に定常な刺激とを順応刺激とした色順応の後に、色弁別を行った。

色交替刺激には白色と錐体軸 (第2色覚異常者の混同色線, 第3色覚異常者の混同色線) 上の赤, 緑, 青を 0.5Hz で等輝度交替させる順応刺激 (順応条件 1) と, 白色と被験者毎のユニーク赤, 緑, 青を 0.5Hz で等輝度交替させる順応刺激 (順応条件 2) の2種類で, 定常刺激は順応条件 1 と同じ赤, 緑, 青を定常的に呈示するものを用いた。テスト刺激は空間的にガウス関数形状で, 時間的にサイン波状に変化する刺激を CRT ディスプレイ上の4箇所の中の1箇所に呈示する。色弁別閾値の決定には 4AFC と階段法 (two down-one up) を組み合わせて用いた。

順応後の色弁別閾値は第3色覚異常者の混同色線上の順応ではその軸に沿って選択的に上昇したが, その他の軸上での順応では色弁別閾値は順応を行った軸よりもやや第3色覚異常者の混同色線よりの軸で選択的に上昇した。また, 軸に沿って, 順応方向だけではなく順応方向とは反対方向にも閾値の上昇が見られた。この結果から, 今回用いた白 ↔ 色の順応刺激は, その順応色と同じ色チャンネル (赤, 緑, 青, 黄チャンネル) だけを単独に順応しているのではなく, その色と組み合わせられた反対色チャンネルをも順応していることを示唆している。

キーワード 反対色チャンネル, 色交替刺激, 選択的順応

Abstract

Color discrimination under different chromatic adaptations
by pre-presented stimuli.

Yoshinao FUKADA

Color discrimination after color adaptation were conducted by using a stimulus switched from white to another color or not changed for separating the adaptation at cone level and at opponent color channels of post-receptoral level and whether red, green, blue and yellow channels at the opponent color channels are independent each other or not.

Color flickering stimuli were used an adaptation stimulus(adaptation condition 1) switched white to red, green or blue which are on the cone axis(deutaranopic confusion line, tritanopic confusion line) equiluminously at 0.5Hz or an adaptation stimulus(adaptation condition 2) switched white to unique red, green or blue same conditions as adaptation condition 1. Test stimuli, with a spatial Gaussian shape and a temporal form varying sinusoidally, were presented in one of four quadrants on the CRT. 4AFC combined with a staircase procedure was used to determine color discrimination thresholds.

Color discrimination thresholds increased selectively along the tritanopic confusion line after adapting along the line and an another line, color discrimination thresholds increased a little selectively along the axis learned the tritan line. Thresholds increased along the axis not only adaptation direction but also the opponent direction. These results suggest that adaptation stimuli used this experiment didn't only adapt the color

channel(red-, green-, blue- or yellow-channel) which is the same as the adaptation stimulus, but also adapted the opponent color channel which combined with the color channel.

key words opponent color channels,color flickering stimulus,selective adaptation,

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	色覚のメカニズム	1
1.2	色順応	3
1.3	実験目的	3
第 2 章	実験方法	6
2.1	実験装置	6
2.2	被験者	7
2.3	順応刺激	7
2.3.1	順応条件 1	8
2.3.2	順応条件 2	9
2.3.3	順応条件 3	10
2.4	ユニーク色の決定	10
2.5	テスト刺激	16
2.5.1	順応条件 1 の場合のテスト刺激	16
2.5.2	順応条件 2 の場合のテスト刺激	17
2.5.3	順応条件 3 の場合のテスト刺激	18
2.5.4	順応なしの場合のテスト刺激	18
2.6	測光	19
2.6.1	プロジェクタの測光	19
2.6.2	ディスプレイの測光	20
2.7	手順	20
第 3 章	実験結果	23

3.1	順応条件 1	23
3.2	順応条件 2	26
3.3	順応条件 3	28
第 4 章	考察	30
4.1	考察 1 : 順応色が赤, 青のときに見られる対称的な閾値の上昇	30
4.2	考察 2 : 選択的な閾値の上昇がみられる軸の傾き	37
4.3	考察 3 : 定常順応での閾値の大幅な上昇	37
4.4	考察 4 : 反対色チャンネルの独立性の検討	38
第 5 章	結論	39
	謝辞	40
	参考文献	41

目次

1.1	3 錐体の分光感度関数	1
1.2	色覚モデル	2
1.3	Krauscopf の実験で用いられたテスト方向	4
1.4	順応後の閾値の変化	4
2.1	実験装置	7
2.2	被験者 YF の xy 色度図上での順応軸と順応色	8
2.3	順応条件 1 の順応刺激の時間的な変化 (W と R1 の場合)	9
2.4	順応刺激の呈示方法	9
2.5	順応条件 3 の順応刺激の時間的な変化 (R1 の場合)	10
2.6	最初のカラーネーミングに用いる xy 色度図上での色度点 (左) とユニーク色 決定のためのカラーネーミング箇所 (右)	11
2.7	被験者 YF のユニーク赤	12
2.8	被験者 YF のユニーク緑	12
2.9	被験者 YF のユニーク青	13
2.10	被験者 YF のユニーク黄	13
2.11	被験者 YH のユニーク赤	14
2.12	被験者 YH のユニーク緑	14
2.13	被験者 YH のユニーク青	15
2.14	被験者 YH のユニーク黄	15
2.15	閾値でのテスト刺激の時間的な変化 (W と R1 の場合)	16
2.16	テスト刺激の呈示方法	17
2.17	被験者 YF の順応条件 1 におけるテスト方向 (左) と被験者 YH の順応条件 1 におけるテスト方向 (右)	17

2.18	被験者 YF の順応条件 2 におけるテスト方向	18
2.19	順応なしの場合のテスト方向	19
2.20	オパール拡散ガラス上の測光点	20
2.21	ディスプレイの測光点	20
2.22	実験の流れ	21
3.1	被験者 YF の順応条件 1(W↔R1) での順応後の色弁別閾値	24
3.2	被験者 YH の順応条件 1(W↔R1) での順応後の色弁別閾値	24
3.3	被験者 YF の順応条件 1(W↔G1) での順応後の色弁別閾値	25
3.4	被験者 YF の順応条件 1(W↔B1) での順応後の色弁別閾値	25
3.5	被験者 YF の順応条件 2(W↔R2(YF)) での順応後の色弁別閾値	26
3.6	被験者 YF の順応条件 2(W↔G2(YF)) での順応後の色弁別閾値	27
3.7	被験者 YF の順応条件 2(W↔B2(YF)) での順応後の色弁別閾値	27
3.8	被験者 YF の順応条件 3(R3) での順応後の色弁別閾値	28
3.9	被験者 YF の順応条件 3(G3) での順応後の色弁別閾値	29
3.10	被験者 YF の順応条件 3(B3) での順応後の色弁別閾値	29
4.1	被験者 YF の順応色が赤のときの色弁別結果 (1)	31
4.2	被験者 YF の順応色が赤のときの色弁別結果 (2)	32
4.3	被験者 YF の順応色が緑のときの色弁別結果 (1)	33
4.4	被験者 YF の順応色が緑のときの色弁別結果 (2)	34
4.5	被験者 YF の順応色が青のときの色弁別結果 (1)	35
4.6	被験者 YF の順応色が青のときの色弁別結果 (2)	36
4.7	鋸状波の順応刺激	38
4.8	サイン波状の順応刺激	38

第 1 章

はじめに

この章では，色覚のメカニズムと色順応について説明をし，それらをふまえた上で，実験目的について説明する。

1.1 色覚のメカニズム

人間の網膜上には L, M, S の 3 種の錐体と呼ばれる光受容器が存在する。3 種の錐体はおよそ 400nm~700nm の波長の光に対して図 1.1 のような異なる分光感度を持ち，これによって人間は異なる波長の光を見分けることが出来る。L, M, S 錐体はそれぞれ長波長 (Long-wavelength), 中波長 (Middle-wavelength), 短波長 (Short-wavelength) に対して感度が高い錐体のことである。

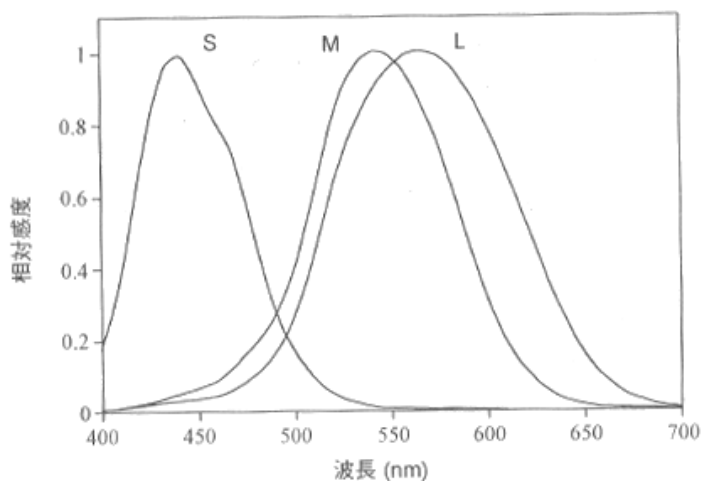


図 1.1 3 錐体の分光感度関数。各関数は最大値を 1 に正規化してある。（「色覚のメカニズム」より）

図 1.2 は一般的な色覚モデルである。色覚のメカニズムは第 1 ステージである錐体からの応答を図 1.2 のように第 2 ステージで和や差をとることによって反対色チャンネルと輝度チャンネルの応答を作っている。そして、更に高次のレベルへと送られているとされている。

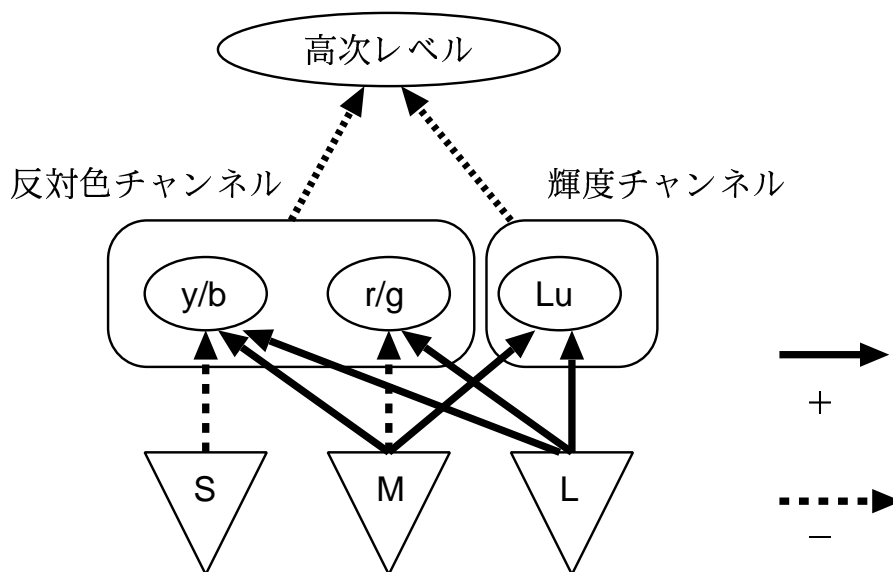


図 1.2 色覚モデル。錐体からの反対色応答への変換モデルを示す一般的な色覚モデル。(「色覚のメカニズム」より)

下の式は L, M, S 錐体から各チャンネルへの変換を示した式である。r/g チャンネルの右の式で 0.05S を足しているのは短波長での赤みを説明するためである。

$$\begin{cases} r/g = L - 2M \text{ もしくは } L - 2M + 0.05S \\ y/b = (L * M) - S \\ Lu = (L + M) \end{cases}$$

反対色とは一つの色相の中に同時に存在できない色のことを言い、赤と緑、青と黄がそれぞれ反対色にあたる。第 2 ステージの r/g, y/b チャンネルでは赤、緑、青、黄の反対色がそれぞれ対になった赤-緑、青-黄の 2 つのチャンネルなのか、それとも赤、緑、青、黄がそれぞれ独立した 4 つのチャンネルなのかは分かっていない。

1.2 色順応

色順応とは、ある同じ色をずっと見ていると、その色の色みが薄れて行く現象のことを言う。例えば、赤い光を見続けた後で同じ色の赤い紙を見ると、その紙の色は赤みが薄れて白く見える。この現象は3種の錐体の選択的な感度変化や、それ以降のレベルでの反対色的な順応などによって説明されている。

色順応時の錐体の感度変化は von Kries の係数法則により次式のように表される。

$$\begin{cases} s' = \frac{s}{s_A} \\ m' = \frac{m}{m_A} \\ l' = \frac{l}{l_A} \end{cases}$$

上の式の s' , m' , l' は順応後の S, M, L 錐体の感度, s , m , l は順応前の S, M, L 錐体の感度, s_A , m_A , l_A は順応刺激に対する S, M, L 錐体の応答を示している。錐体以降のレベルの順応は外側膝状体 (LGN, lateral geniculate nucleus) レベルではなく、皮質レベルで生じていると考えられている [5]。

1.3 実験目的

第2ステージの反対色的チャンネルについて調べた実験として Krausopf らのものがある [1]。彼らの実験では色空間内の特定の軸に沿ってなだらかに変化するような刺激を順応刺激とし順応後の色弁別閾値を測定している。図 1.3 の P_1 は青の輝度が一定となる軸, P_2 は赤と緑の輝度の比が一定になる軸である。図 1.4 は Krausopf らの実験の結果である。左は P_1 の軸に沿って順応したときの結果, 右は P_2 の軸に沿って順応したときの結果である。この結果より Krausopf らは色空間内には3つの選択的順応効果を示す軸が存在するとした。1つは輝度軸で、他の2つは赤-緑, 青-黄軸である。彼らは、このように特定の軸に沿って順応したときに選択的な順応を示すということは反対色チャンネルには2つの色チャンネルしかないということを支持していると言っているが、反対色チャンネルはそれぞれの色が独立な4つの色チャンネルからなっているかも知れないとも言っている。

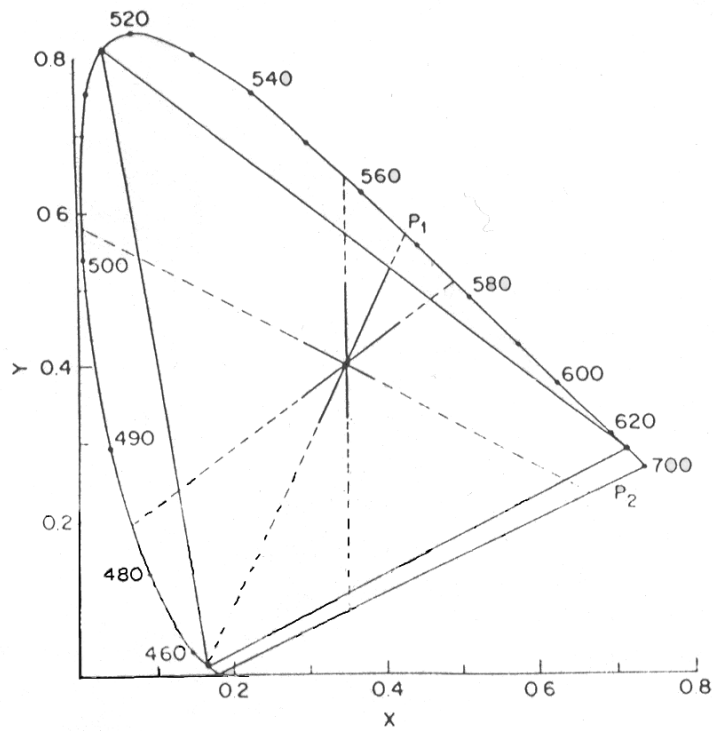


図 1.3 Krausopf の実験で用いられたテスト方向. (Krausopf,1982 より)

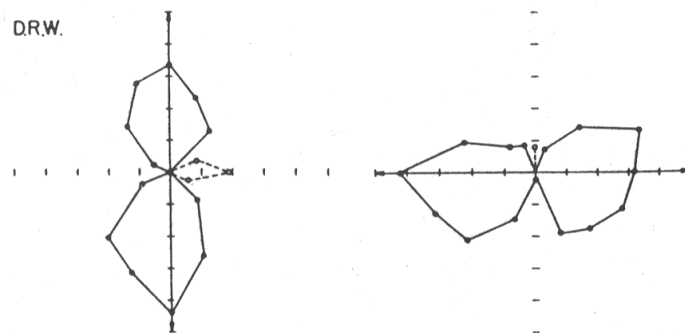


図 1.4 順応後の閾値の変化. 赤-緑軸での順応 (左), 青-黄軸での順応 (右)(Krausopf, 1982 より)

Webster とも色空間内の同じ軸を用いて同様の実験を行った結果、順応の軸に沿って選択的な順応効果が見られるという結果を得ている [2].

しかし、Krausopf や Webster らの実験では順応刺激として反対色の両方を変化するような刺激 (例えば赤 \leftrightarrow 緑) を用いているので、その順応では、反対色チャンネルの両方を刺激してしまっているのではないかと思われる。そこで、今回の実験では軸に沿って反対色の両方に变化するような刺激を順応刺激として用いず、錐体混同色線上の片方の色と白色を等輝度色交替させて (例えば白 \leftrightarrow 赤) これを順応刺激とし、反対色チャンネルの分離を試みた。錐体混同色とは 3 種の錐体のうちのどれかが無い場合に区別出来ない一列の色の列のことで、L, M, S 錐体が無い場合は、錐体混同色線上のどの色も同じ色に見える。今回の実験には M 錐体の無い場合の混同色線である第 2 色覚異常者の混同色線 (Deuteranopic confusion line) と第 3 色覚異常者の混同色線 (Tritanopic confusion line) 上の赤, 緑, 青を順応色とした。

さらに、色の見えに含まれている色みによって、その色の反対色チャンネルを順応していると考え [3], 色交替する順応刺激の順応色に被験者毎のユニーク赤, 緑, 青も用いた。また、定常的刺激による色順応は、錐体レベルの順応のみで説明できるという定量的な実験結果も提出されている [5] ことから、錐体レベルでの順応効果を強めた結果を見るために定常刺激による色順応も行った。

第 2 章

実験方法

2.1 実験装置

図 2.1 は実験ブースを真上から見た図である。ブースのサイズは縦が 90cm 、横が 290cm 、高さが 180cm であり、被験者の左方向はカーテンで遮光をしてありその他は黒い板で遮光をしてある。また、被験者の入る場所のサイズは 90cm 、横が 90cm 、高さが 180cm で、その中に椅子を設置して被験者はその椅子に座りさらに顎台に顎を乗せて実験を行う。このときの被験者の目からディスプレイ面までの距離は 133.86cm である。

順応刺激の光源には液晶プロジェクタ (NEC VL-1000) を使用し、テスト刺激の呈示には Barco monitor (Model CCID-121) を使用した。順応刺激呈示のための光学系は、レンズ 1~3 (L1, L2, L3)、オパール拡散ガラス (O)、熱線吸収フィルタ (F)、シャッタ (Sh) とビームスプリッタ (BS) からなる。プロジェクタからの光は L1 により平行光にされ、L2 によって集光される。L2 によって集光された光は Sh の中心を通り、L3 により再び平行光に戻されて F, O, BS を通して被験者に呈示される。BS を抜ける余分な光は暗箱に入る。Sh は順応刺激の呈示中は開いており、テスト刺激の呈示中は閉じている。Sh が閉じることによってプロジェクタからの光は完全に遮断される。また、テスト刺激はディスプレイ上に呈示され、被験者はこれを BS を通して見る。ディスプレイにはディスプレイ面しか見えないようなカバーを掛けた。さらに、ディスプレイの前に真中に縦 24.7cm 、横 31.5cm の開口部を持つ遮蔽板を置くことによってディスプレイの余分な光が被験者に見えないようにした。

テスト刺激の制御と順応刺激の切替えのタイミングの制御は VSG2/3 (Cambridge Research Systems) によって行われた。

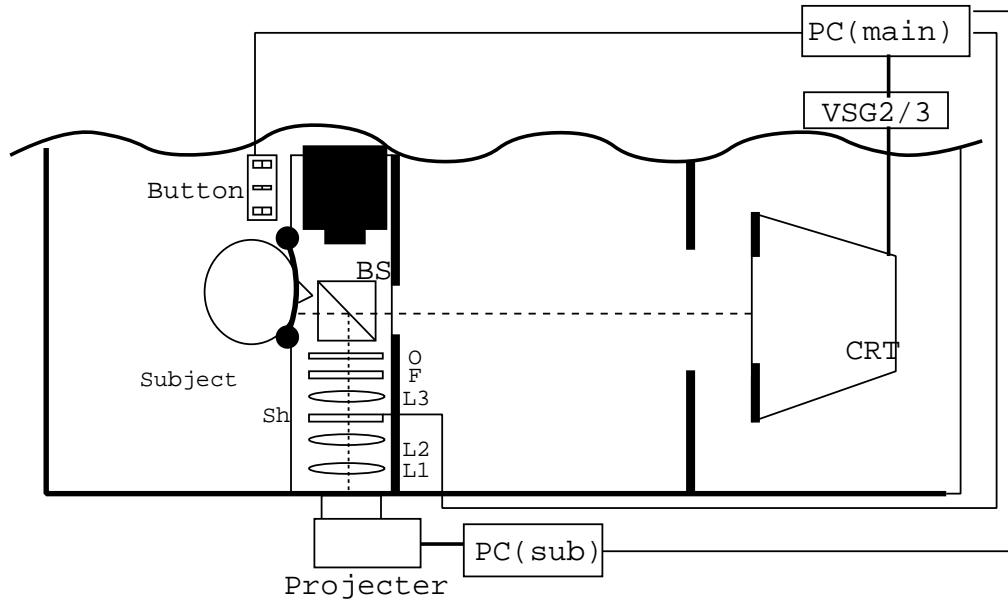


図 2.1 実験装置. L1, L2, L3: レンズ, O: オパール拡散ガラス, F: 熱線吸収フィルタ, Sh: シャッタ, BS: ビームスプリッタ

2.2 被験者

被験者は 22 歳の男性 2 名 (YF, YH) で、いずれも石原式, Plate D-15 によって色覚正常であることが確認されている。また、被験者 YF はこの実験の実験者で、YH はこの実験の目的に対してナীবである。

2.3 順応刺激

順応刺激には以下に示すような順応条件 1~3 を用いた*¹。図 2.2 で示すように xy 色度図上で $(x,y)=(0.333,0.333)$ の点を通る第二色覚異常者の混同色線上、第三色覚異常者の混同色線上の点をそれぞれ赤, 緑, 黄, 青方向についてとりそれを R1, G1, B1, Y1 とし、被験者毎のユニーク色を被験者 YF の場合は R2(YF), G2(YF), B2(YF), Y2(YF) というように後ろに被験者のイニシャルをつけて表記したものとした。また、 $(x,y)=(0.333,0.333)$ の点を W 第二色覚異常者の混同色線を D 軸, 第三色覚異常者の混同色線を T 軸とする。

*¹ 順応条件 2, 3 については被験者 YF のみしか行っていない。

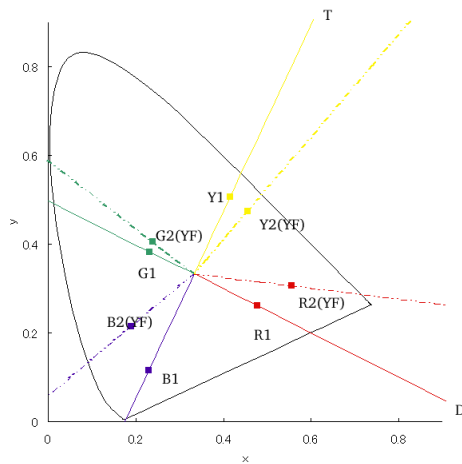


図 2.2 被験者 YF の xy 色度図上での順応軸と順応色. 図の実線は D 軸, T 軸方向を示し, 破線は被験者 YF のユニーク色方向を示す.

それぞれの点の xy 色度座標は $R1(0.478, 0.261)$, $G1(0.232, 0.383)$, $B1(0.230, 0.116)$, $Y1(0.415, 0.506)$, $R2(YF)(0.556, 0.306)$, $G2(YF)(0.238, 0.406)$, $B2(YF)(0.190, 0.215)$, $Y2(YF)(0.455, 0.474)$ となった.

2.3.1 順応条件 1

順応条件 1 は, W と $R1$, $G1$, $B1$ を図 2.3 のように時間的に変化させる順応刺激を用いた.

この順応刺激は図 2.4 のように周波数は 0.5Hz で 1 秒毎に W と順応色が $2000\text{cd}/\text{m}^2$ の等輝度で交替する. テスト刺激の前に呈示される毎回の順応時間は 6 秒, 実験の最初に行われる順応の時間は 5 分である. 順応刺激は視角 13.6° の正方形で, 被験者にはビームスプリッタを通して順応刺激が図 2.4 のように重なって見える.

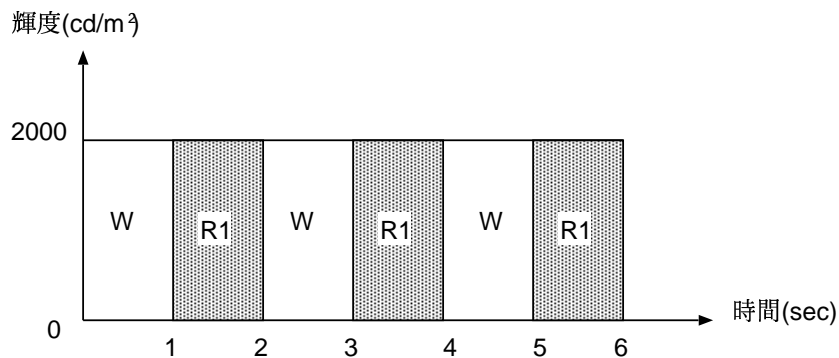


図 2.3 順応条件 1 の順応刺激の時間的な変化 (W と R1 の場合). 図の W とあるところが W が呈示されている状態で, R1 とある黒い部分は R1 が呈示されている状態を示している. 縦軸は輝度 (cd/m^2) で, 順応刺激の呈示中は $2000cd/m^2$ で一定である. 横軸は時間 (sec) である.

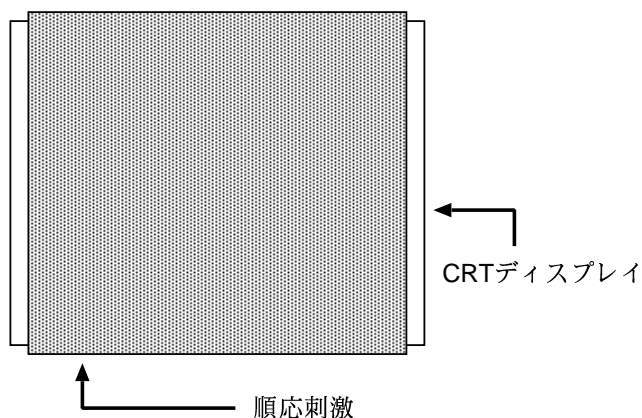


図 2.4 順応刺激の呈示方法

2.3.2 順応条件 2

順応条件 2 は, W とユニーク色 (R2(YF), G2(YF), B2(YF)) を順応条件 1 と同様に周波数 0.5Hz, $2000cd/m^2$ の等輝度で交替させるような刺激を用いて被験者 YF のみについてこの順応条件での実験を行った. その他の条件は順応条件 1 と同じである.

2.3.3 順応条件 3

順応条件 3 は、R1, G1, B1 を順応条件 1, 2 のように W と交替させて呈示するのではなく、R1, G1, B1 のみを定常呈示する。図 2.5 は順応条件 3 の時間的な変化を図示したものである。

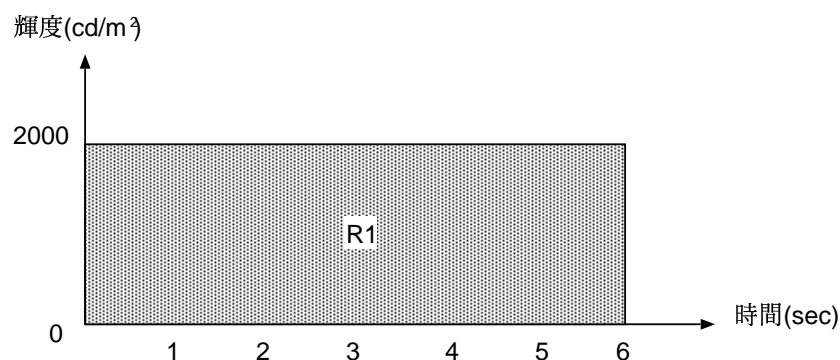


図 2.5 順応条件 3 の順応刺激の時間的な変化 (R1 の場合)。R1 とある黒い部分は R1 が呈示されている状態を示している。この場合 R1 のみの定常呈示となる。縦軸は輝度 (cd/m^2) で、順応刺激の呈示中は $2000cd/m^2$ で一定である。横軸は時間 (sec) である。

2.4 ユニーク色の決定

被験者毎のユニーク色はカラーネーミングによって決定される。被験者はカラーネーミングを行う前に 5 分間の暗順応とさらに 5 分間の前順応を行いその後にカラーネーミングを行う。まず、被験者にディスプレイ上に呈示される正方形の色刺激についてその色がどのような色であるかを R, G, B, Y を使って例えば、R:8, B:2 のように合計 10 ポイントで答えてもらう。この作業に慣れるために最初に 1, 2 回練習を行った。一つの点に対して 5 回の実験を行いその平均をその点での色みとした。

最初に図 2.6(左) のように順応色として用いる D 軸, T 軸上の点 4 点と二つの軸の間の軸上の点 4 点、合計 8 点でのカラーネーミングを行い、図 2.6(右) の (a)~(h) の間

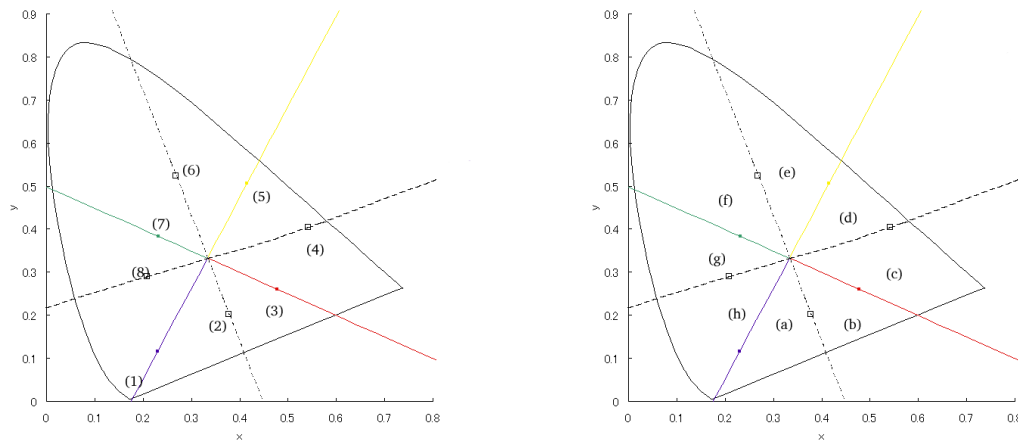


図 2.6 最初のカラーネーミングに用いる xy 色度図上での色度点 (左) とユニーク色決定のためのカラーネーミング箇所 (右)

どこにユニーク色になる点が存在するかを調べた。それぞれの色度点 (1), (3), (5), (7) はそれぞれ B1, R1, Y1, G1 と同じでその他の点は (2)(0.542,0.405), (4)(0.378,0.203), (6)(0.209,0.290), (8)(0.268,0.523) となった。

最初のカラーネーミングにより求めたユニーク色の大体の位置から更に詳しく xy 色度図上の点を求める。例えば被験者 YF のユニーク赤が図 2.6(右) の (c) の位置であったとすると (3) の存在する軸と (4) の存在する軸との間の角度を 14 等分してその軸上の点をカラーネーミングして、最も他の色みの少ない点をユニーク色とした。

図 2.7~図 2.14 はカラーネーミングの結果である。図の横軸にとってある数値は角度で、カラーネーミングを行った軸と $y=0.333$ を通り x 軸に平行な軸との角度をそれぞれ反時計周りを正の方向として、 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ でとったものである。被験者 YF のユニーク赤は xy 色度図上で $(x,y)=(0.556,0.306)$ 、ユニーク緑は $(0.238,0.406)$ 、ユニーク青は $(0.19,0.215)$ 、ユニーク黄は $(0.455,0.474)$ となった。同様に被験者 YH のユニーク赤は xy 色度図上で $(x,y)=(0.618,0.344)$ 、ユニーク緑は $(0.252,0.461)$ 、ユニーク青は $(0.195,0.235)$ 、ユニーク黄は $(0.459,0.472)$ となった。

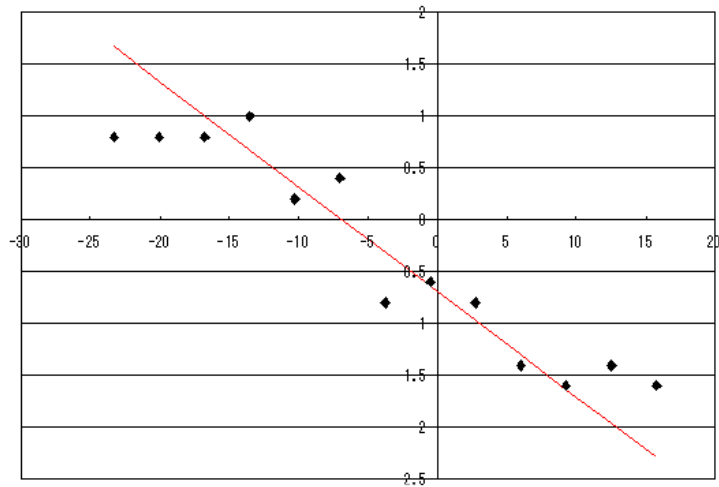


図 2.7 被験者 YF のユニーク赤。縦軸の+方向に青み, -方向に黄みをとった。横軸はカラーネーミングを行った軸と xy 色度図上の $y=0.333$ を通り x 軸に平行な軸との角度を示す。プロットされている点は 5 回のカラーネーミングの平均値。直線はカラーネーミングの結果を近似した直線。

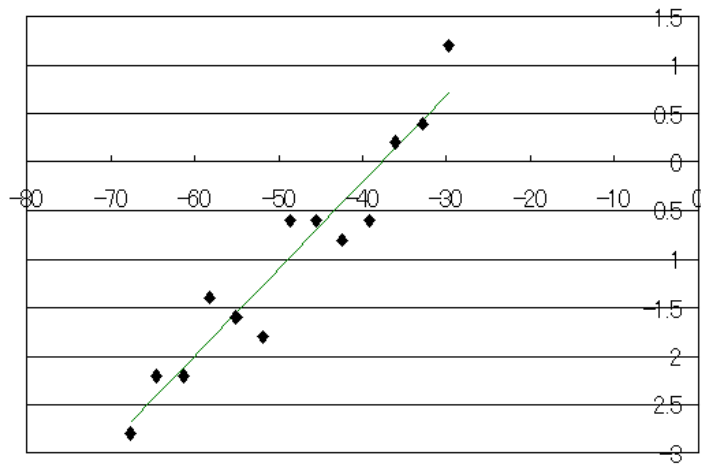


図 2.8 被験者 YF のユニーク緑。縦軸の+方向に青み, -方向に黄みをとった。横軸はカラーネーミングを行った軸と xy 色度図上の $y=0.333$ を通り x 軸に平行な軸との角度を示す。プロットされている点は 5 回のカラーネーミングの平均値。直線はカラーネーミングの結果を近似した直線。

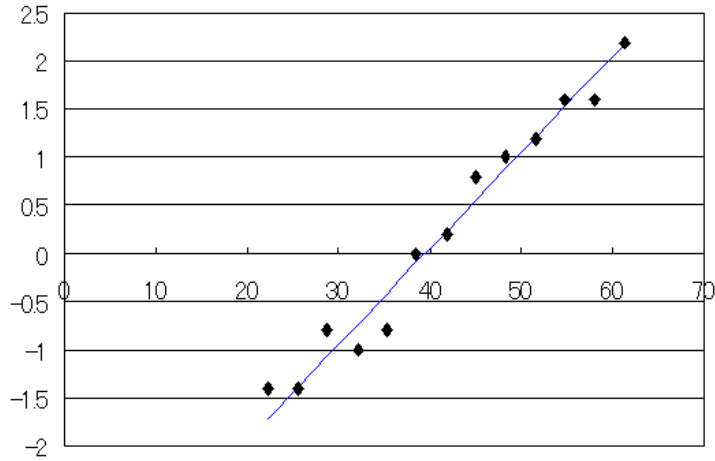


図 2.9 被験者 YF のユニーク青。縦軸の+方向に赤み, -方向に緑みをとった。横軸はカラーネーミングを行った軸と xy 色度図上の $y=0.333$ を通り x 軸に平行な軸との角度を示す。プロットされている点は 5 回のカラーネーミングの平均値。直線はカラーネーミングの結果を近似した直線。

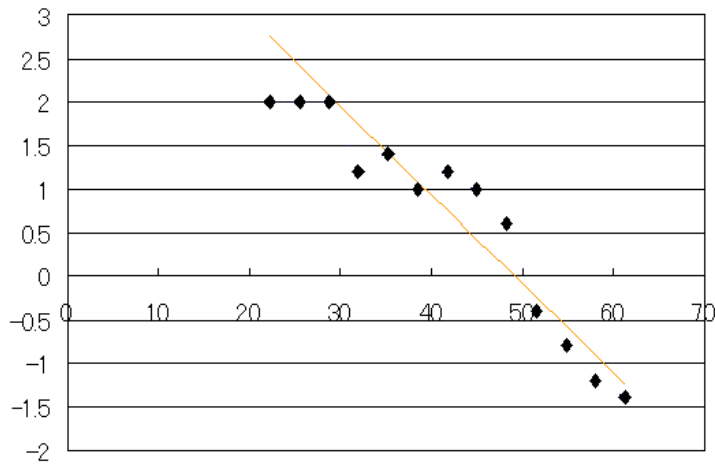


図 2.10 被験者 YF のユニーク黄。縦軸の+方向に赤み, -方向に緑みをとった。横軸はカラーネーミングを行った軸と xy 色度図上 $y=0.333$ を通り x 軸に平行な軸との角度を示す。プロットされている点は 5 回のカラーネーミングの平均値。直線はカラーネーミングの結果を近似した直線。

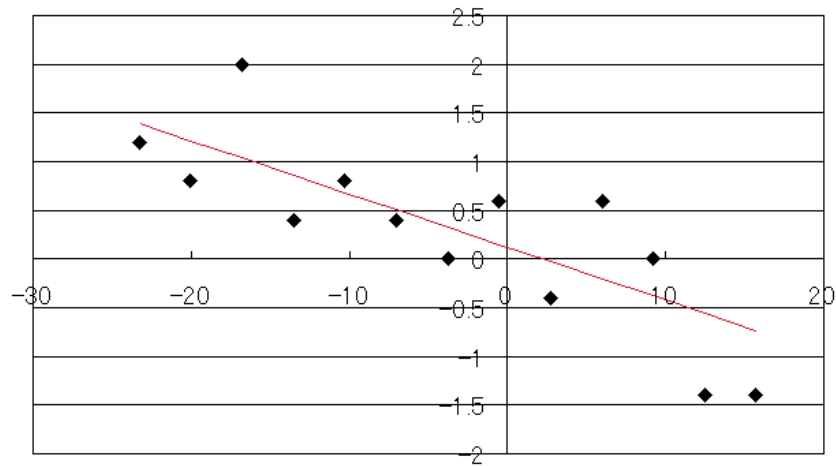


図 2.11 被験者 YH のユニーク赤。縦軸の+方向に青み, -方向に黄みをとった。横軸はカラーネーミングを行った軸と xy 色度図上の $y=0.333$ を通り x 軸に平行な軸との角度を示す。プロットされている点は 5 回のカラーネーミングの平均値, 直線はカラーネーミングの結果を近似した直線である。

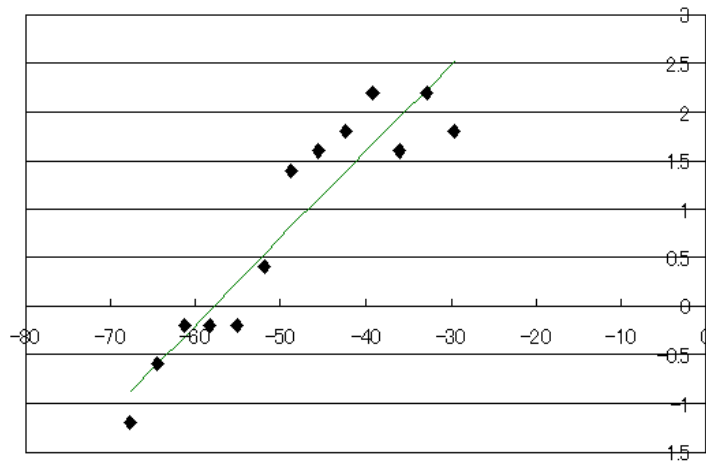


図 2.12 被験者 YH のユニーク緑。縦軸の+方向に青み, -方向に黄みをとった。横軸はカラーネーミングを行った軸と xy 色度図上の $y=0.333$ を通り x 軸に平行な軸との角度を示す。プロットされている点は 5 回のカラーネーミングの平均値, 直線はカラーネーミングの結果を近似した直線。

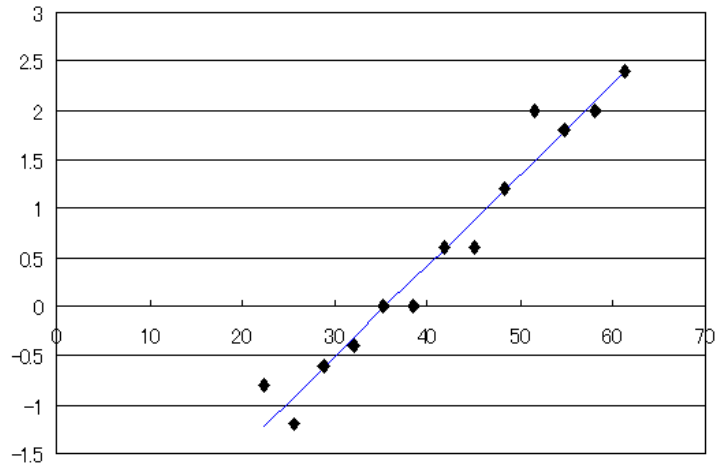


図 2.13 被験者 YH のユニーク青。縦軸の+方向に赤み、-方向に緑みをとった。横軸はカラーネーミングを行った軸と xy 色度図上の $y=0.333$ を通り x 軸に平行な軸との角度を示す。プロットされている点は 5 回のカラーネーミングの平均値。直線はカラーネーミングの結果を近似した直線。

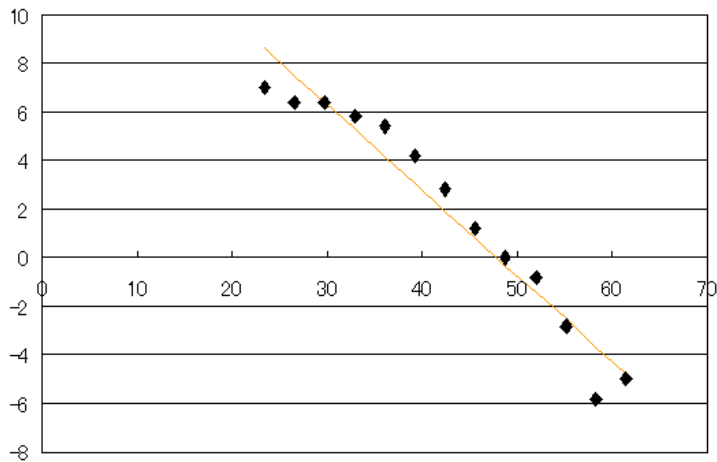


図 2.14 被験者 YH のユニーク黄。縦軸の+方向に赤み、-方向に緑みをとった。横軸はカラーネーミングを行った軸と xy 色度図上 $y=0.333$ を通り x 軸に平行な軸との角度を示す。プロットされている点は 5 回のカラーネーミングの平均値。直線はカラーネーミングの結果を近似した直線。

2.5 テスト刺激

テスト刺激の方向は順応条件 1~3 において次のような方向を採用した。テスト刺激の呈示されるディスプレイは縦が視角 12° 、横が視角 16° である。

2.5.1 順応条件 1 の場合のテスト刺激

順応条件 1 の場合のテスト刺激と背景の輝度は 10cd/m^2 、呈示時間は 1 秒間で図 2.15 に示すようにサイン波状に 500msec で立上り 500msec で立下る。テスト刺激は背景と等輝度で色度のみ変化する SD 直径 2.63° のガウス関数形状の円形で中心の固視点からの距離が 1.99° である。

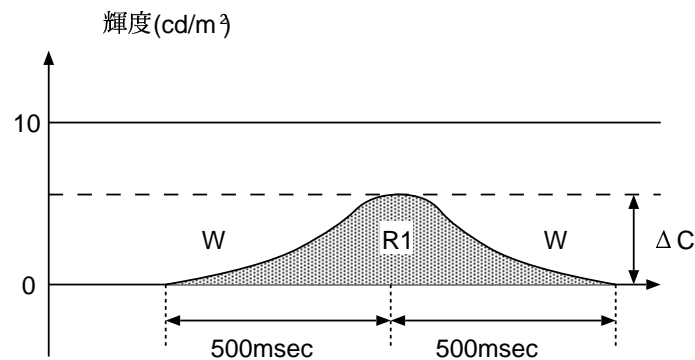


図 2.15 閾値でのテスト刺激の時間的な変化 (W と R1 の場合)。図の縦軸は輝度、横軸は時間を示す。ΔC は弁別閾値を示す。

テスト刺激は図 2.16 のように固視点を中心とした 4 箇所の中の 1 箇所にランダムに呈示される。

色弁別を行う方向は図 2.17 で示されるように順応条件 1 のときに順応色として用いる R1, G1, B1 と Y1 の 4 方向と $u'v'$ 色度図上でテスト方向の間隔がなるべく等しくなるような方向を任意に 9 方向選び、被験者 YF に関してはこの 13 方向を順応条件 1 でのテスト方向とした。被験者 YH に関しては、順応色 4 方向とその他に任意に選択した 6 方向の合計 10 方向を順応条件 1 の場合のテスト方向としてとった。

テスト刺激の 1 ステップは $u'v'$ 色度図上で 0.001 の距離であり、順応なしのときの色弁

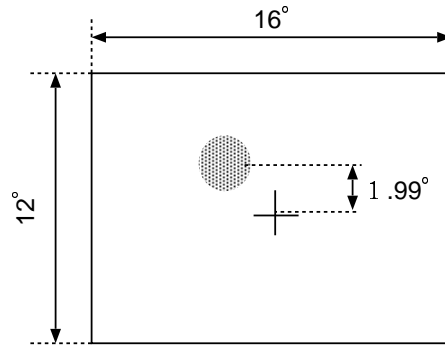


図 2.16 テスト刺激の呈示方法. 図の中心は固視点で, 黒い丸がテスト刺激を示す. テスト刺激の中心から固視点までは縦, 横にそれぞれ視覚 1.99° ずつ離れている.

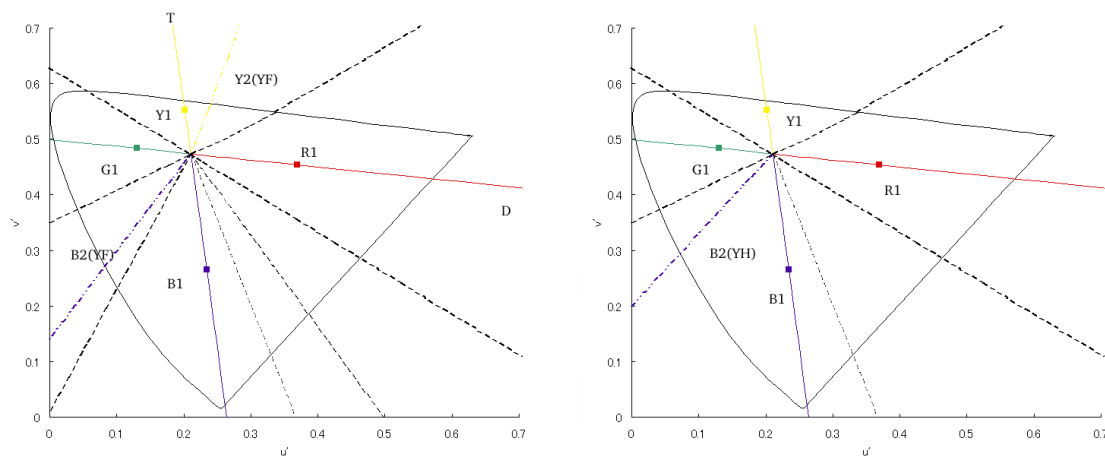


図 2.17 被験者 YF の順応条件 1 におけるテスト方向 (左) と被験者 YH の順応条件 1 におけるテスト方向 (右). 図の実線は順応条件 1 での順応色 (R1, G1, B1, Y1) 方向, 破線は被験者毎のユニーク色方向, 点線はその他のテスト方向を示す.

別は 200 ステップから弁別を開始し, 順応後の色弁別は 350 ステップから弁別を開始した.

2.5.2 順応条件 2 の場合のテスト刺激

順応条件 2 ではテスト方向以外は順応条件 1 の場合と同じ条件である. この場合のテスト方向は図 2.18 で示すように被験者毎のユニーク色 4 方向と順応条件 1 のときと同様に $u'v'$ 色度図でテスト方向の間隔がなるべく等しくなるような方向 9 方向の合計 13 方向を選んだ.

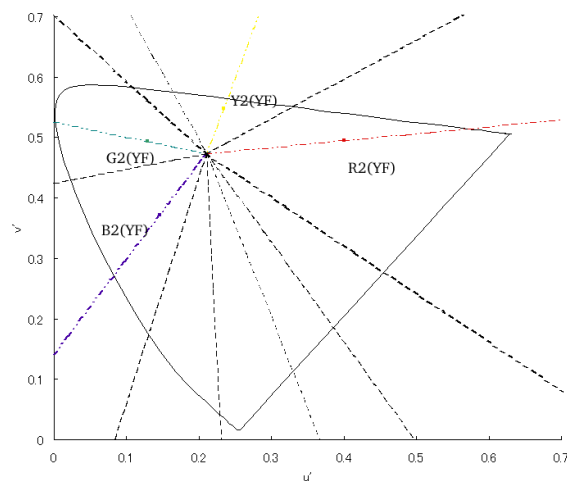


図 2.18 被験者 YF の順応条件 2 におけるテスト方向。図の破線は被験者毎のユニーク色方向，点線はその他のテスト方向を示す。

2.5.3 順応条件 3 の場合のテスト刺激

順応条件 3 の場合のテスト刺激は順応条件 1 の場合と同じものを用いた。

2.5.4 順応なしの場合のテスト刺激

順応なしの場合のテスト刺激はテスト方向として R1, G1, B1, Y1 の方向とその間の方向を図 2.19 で示すようにとった。このテスト方向は被験者 YF, YH の両方について用いた。

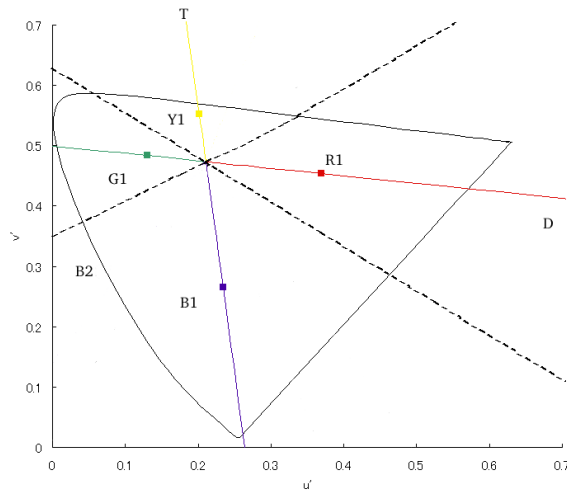


図 2.19 順応なしの場合のテスト方向. 図の実線は R1, G1, B1, Y1 を示し, 点線はその他のテスト方向を示す.

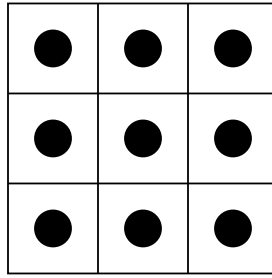
2.6 測光

2.6.1 プロジェクタの測光

CT-1000(MINOLTA) を用いビームスプリッタを通してオパール拡散ガラス上の輝度を測光する. まず初めに CT-1000 を用いてプロジェクタの各 RGB 値における輝度と色度を測定した. このときの測光点は R, G, B 値の 0~500 を 20 ずつとっていった. R, G, B 値を 0~500 としたのはこの実験で順応刺激作成のためのプログラムにおいて最大の出力が R, G, B それぞれ 504 としているからである. この測光の結果からプロジェクタの γ 関数を求め順応色の輝度と色度点から必要な RGB 値の予測を行った.

CT-1000 を用いて順応刺激が一様な輝度になっているかを調べるために図 2.20 のようにオパール拡散ガラス上の 9 点を測光した. このときの RGB 値は $(R, G, B)=(500, 0, 0)$, $(R, G, B)=(0, 300, 0)$, $(R, G, B)=(0, 0, 500)$ である.

また, $(R, G, B)=(200, 0, 0)$, $(R, G, B)=(100, 0, 0)$, $(R, G, B)=(0, 200, 0)$, $(R, G, B)=(0, 100, 0)$, $(R, G, B)=(0, 0, 200)$, $(R, G, B)=(0, 0, 100)$ ではオパール拡散ガラス上の真中の点のみの測光を行った.



オパール拡散ガラス

図 2.20 オパール拡散ガラス上の測光点. 点は測光したポイントとサイズ (直径 2°) を示す.

以上の結果を用いて必要な順応色の RGB 値を予測し, 予想された RGB 値付近で更に測光を行い必要な順応色の色度と輝度になるように RGB 値を変えながら微調整をして行った.

2.6.2 ディスプレイの測光

ディスプレイの測光は LS-100(MINOLTA) と CT-1000(MINOLTA) を用いて測光を行った. ディスプレイの測光はビームスプリッタを外した場合と着けた場合での測光を行った. 測光を行った点は図 2.21 のようにディスプレイ上の 4 箇所である.

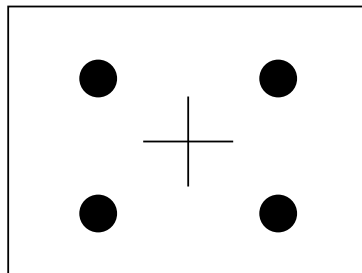


図 2.21 ディスプレイの測光点. 点は測光したポイントとサイズ (直径 2°) を示す.

2.7 手順

実験は次の図 2.22 に示すような流れで行われる.

まず, 5 分間の暗順応を行い, その後に 5 分間の前順応を行う. この 5 分間の前順応は色

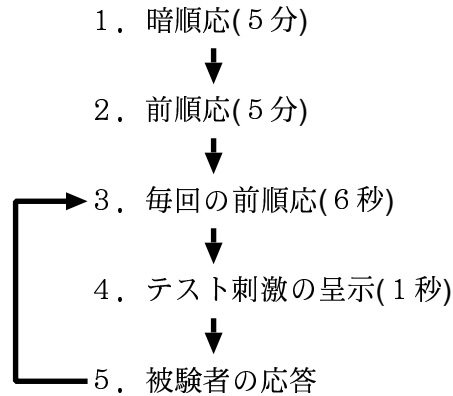


図 2.22 実験の流れ. 図の矢印は実験の流れを示しており, 5 から 3 への矢印は弁別閾値が求まるまで実験を繰り返すことを意味している.

順応を行わずに色弁別を行う場合はディスプレイにテスト刺激呈示用の背景を呈示する. 色順応後の色弁別を行う場合はそれぞれの順応条件の場合の順応刺激を 5 分間呈示する. 5 分間の暗順応と色順応は実験の最初に 1 回だけ行う. 以上の順応の後にビープ音が鳴り被験者が手元のボタンを押すと図 2.22 の 3 番に進む. 3 番ではテスト刺激呈示の前に毎回の順応として 6 秒間の前順応を行う. 但し, 色順応を行わずに色弁別を行う場合はこの毎回の前順応は行わない. 順応刺激の呈示終了後にビープ音が鳴り, それと同時にテスト刺激の呈示が開始される. テスト刺激の呈示が終了すると再びビープ音が鳴りテスト刺激の呈示終了を知らせる. テスト刺激呈示終了のビープ音が鳴ったら被験者になるべく早くテスト刺激が呈示されたと思った場所を答えてもらった. 応答の方法は 4AFC(four-alternative forced-choice)を用いて, ディスプレイ上の 4 箇所内のいずれかに呈示されるテスト刺激を手元のボタンによって答えてもらった. もし, 被験者が 4 箇所内のどこに呈示されたか分からない場合でも, 4 つのボタンの内どれでもいいので必ず答えてもらうようにした. 被験者がボタンを押して答えると再び 6 秒間の前順応に戻る. これをテストを行う色全てに対して弁別閾値が求まるまで繰り返す. 被験者はこの実験を通してディスプレイの中央の固視点を固視する. しかし, 順応刺激呈示中は固視点が見えないのでなるべく眼球を動かさないようにした.

弁別閾値の決定は two down-one up の階段法により被験者の応答が 2 回続けてテスト刺激の呈示された場所と同じときはテスト刺激のステップを下げ, 被験者の応答がテスト刺激

の呈示された場所と違うときはテスト刺激のステップを上げる。こうして求めた6回の方向変化点のうち3~6回目の方向変化点における値の平均値により決定した。

第 3 章

実験結果

順応条件 1~3 において順応色を赤，緑，青としたときの順応後の色弁別の結果を順応条件 1 から順番に示して行く．実験結果はすべて $u'v'$ 色度図上に 3 回の実験の平均値をプロットしている．グラフの縦軸は u' ，横軸は v' ，グラフ中の矢印は順応色の方向を示している．いずれのグラフにも，順応なしのときの色弁別閾値を一緒にプロットしている．

3.1 順応条件 1

図 3.1 は順応条件 1 において順応色を赤，図 3.3 は順応色を緑，図 3.4 は順応色を青としたときの被験者 YF の実験結果である．図 3.2 は順応条件 1 において順応色を赤としたときの被験者 YH の実験結果である．

順応色が青の場合の閾値上昇は T 軸に沿って大きくなっており，T 軸と垂直な軸では閾値上昇がほとんど見られないという選択的な順応の結果を示している．順応色が赤，緑の場合は D 軸に沿って閾値上昇が大きくなるのではなく D 軸よりも T 軸よりの軸に沿って閾値上昇が大きくなっており，更に，その軸に垂直な軸では閾値上昇が小さくなっている．閾値の上昇はある軸に沿って大きくなっているが，順応した方向だけではなく，その反対方向にも閾値の上昇が見られた．

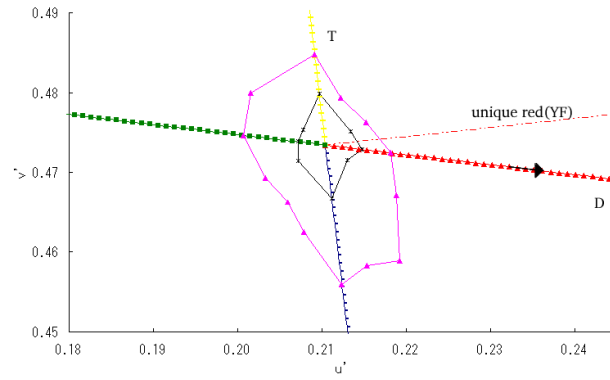


図 3.1 被験者 YF の順応条件 1($W \leftrightarrow R1$) での順応後の色弁別閾値。縦軸に u' ，横軸に v' をとっている。図の破線は被験者 YF のユニーク赤方向である。▲： $W \leftrightarrow R1$ での順応後の色弁別閾値，*：順応なしでの色弁別閾値。矢印は順応方向を示す。

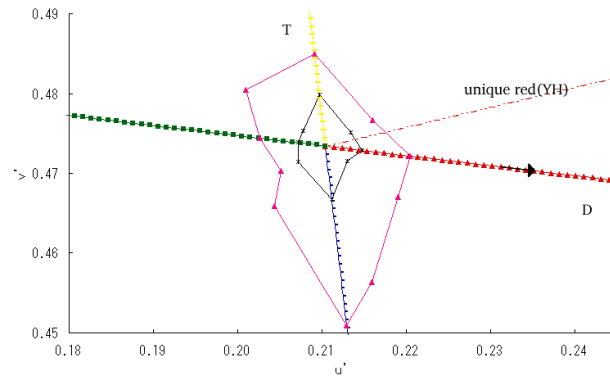


図 3.2 被験者 YH の順応条件 1($W \leftrightarrow R1$) での順応後の色弁別閾値。縦軸に u' ，横軸に v' をとっている。図の破線は被験者 YH のユニーク赤方向である。▲： $W \leftrightarrow R1$ での順応後の色弁別閾値，*：順応なしでの色弁別閾値。矢印は順応方向を示す。

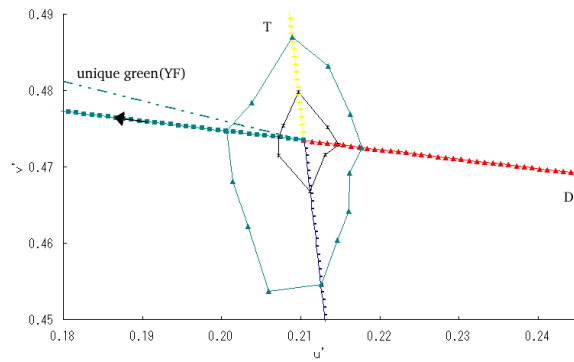


図 3.3 被験者 YF の順応条件 1(W ↔ G1) での順応後の色弁別閾値。縦軸に u' ，横軸に v' をとっている。図の破線は被験者 YF のユニーク緑方向である。▲：W ↔ G1 での順応後の色弁別閾値，*：順応なしでの色弁別閾値。矢印は順応方向を示す。

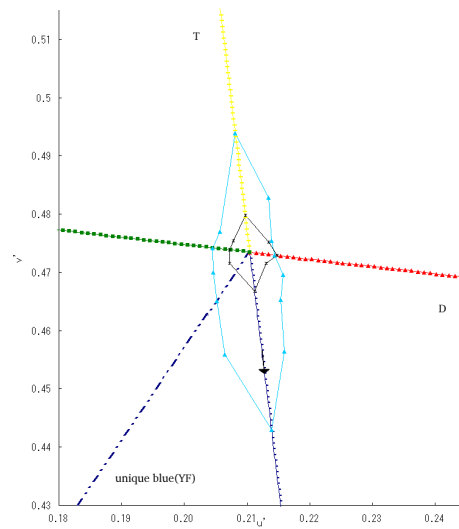


図 3.4 被験者 YF の順応条件 1(W ↔ B1) での順応後の色弁別閾値。縦軸に u' ，横軸に v' をとっている。図の破線は被験者 YF のユニーク青方向である。▲：W ↔ B1 での順応後の色弁別閾値，*：順応なしでの色弁別結果。矢印は順応方向を示す。

3.2 順応条件 2

図 3.5 は順応条件 2 において順応色を赤，図 3.6 は順応色を緑，図 3.7 は順応色を青としたときの被験者 YF の実験結果である。

順応条件 2 でも順応条件 1 のときと同様に軸に沿って閾値の上昇が見られるが，順応条件 1 よりも閾値上昇が大きくなる軸が T 軸よりもやや D 軸方向に傾いている。このときの閾値上昇は，S 軸方向だけではなく，D 軸方向にも見られたが，これはユニーク青の方向では S 軸上での順応の場合よりも L，M 錐体を強く刺激しているためと考えられるので，それほど特異な結果と言うわけではない。また，ユニーク赤の結果では順応条件 1 の結果よりも全体的に閾値上昇が大きくなっている。この場合も順応条件 1 の結果と同様に，青方向の方が閾値上昇がやや大きい。このように，順応条件 1 の結果と比べると少しの差異は見られるが全体的な閾値上昇の傾向は順応条件 1 のときと類似している。

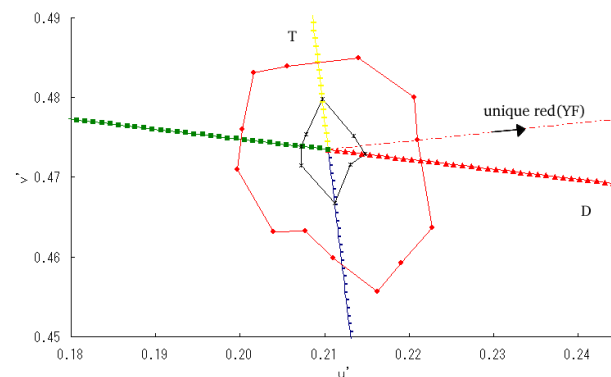


図 3.5 被験者 YF の順応条件 2($W \leftrightarrow R2(YF)$) での順応後の色弁別閾値。縦軸に u' ，横軸に v' をとっている。図の破線は被験者 YF のユニーク赤方向である。●： $W \leftrightarrow R2(YF)$ での順応後の色弁別閾値 *：順応なしでの色弁別閾値。矢印は順応方向を示す。

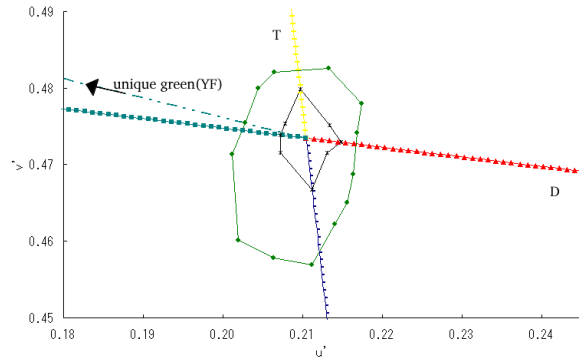


図 3.6 被験者 YF の順応条件 2($W \leftrightarrow G2(YF)$) での順応後の色弁別閾値。縦軸に u' 、横軸に v' をとっている。図の破線は被験者 YF のユニーク緑方向である。●： $W \leftrightarrow G2(YF)$ での順応後の色弁別閾値、*：順応なしでの色弁別閾値。矢印は順応方向を示す。

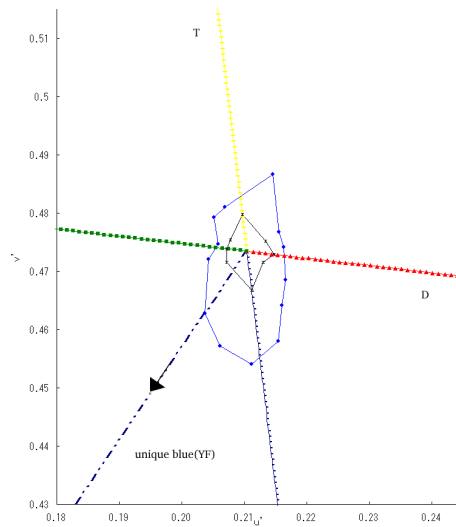


図 3.7 被験者 YF の順応条件 2($W \leftrightarrow B2(YF)$) での順応後の色弁別閾値。縦軸に u' 、横軸に v' をとっている。図の破線は被験者 YF のユニーク青方向である。●： $W \leftrightarrow B2(YF)$ での順応後の色弁別閾値、*：順応なしでの色弁別閾値。矢印は順応方向を示す。

3.3 順応条件 3

図 3.8 は順応条件 2 において順応色を赤，図 3.9 は順応色を緑，図 3.10 は順応色を青としたときの被験者 YF の実験結果である。

順応条件 3 では順応色が赤のときと，青のたときは順応条件 1, 2 よりも明らかに閾値上昇が大きくなっている。閾値上昇が大きくなる軸は，順応色が青のときには T 軸のままで，緑と赤のときは順応条件 1, 2 より更に D 軸の方に傾いている。また，このとき閾値上昇が大きくなる軸では青方向と反対方向の閾値上昇が同じ程度になっている。順応色を緑にしたときの閾値上昇は順応条件 1, 2 とあまり変わっておらず逆に閾値上昇がやや小さい。

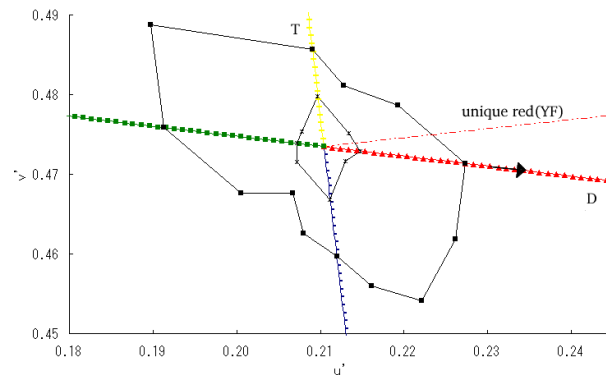


図 3.8 被験者 YF の順応条件 3(R3) での順応後の色弁別閾値。縦軸に u' ，横軸に v' をとっている。図の破線は被験者 YF のユニーク赤方向である。■：R3 での順応後の色弁別閾値，*：順応なしでの色弁別閾値，矢印は順応方向を示す。

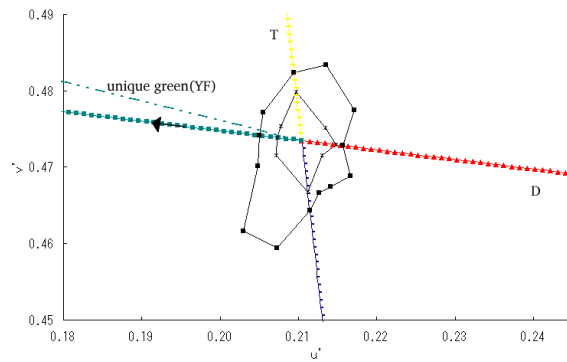


図 3.9 被験者 YF の順応条件 3(G3) での順応後の色弁別閾値。縦軸に u' ，横軸に v' をとっている。図の破線は被験者 YF のユニーク緑方向である。■：G3 での順応後の色弁別閾値，*：順応なしでの色弁別閾値。矢印は順応方向を示す。

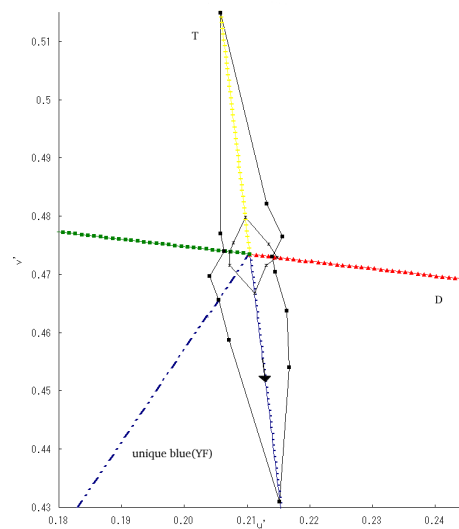


図 3.10 被験者 YF の順応条件 3(B3) での順応後の色弁別閾値。縦軸に u' ，横軸に v' をとっている。図の破線は被験者 YF のユニーク青方向である。■：B3 での順応後の色弁別閾値，*：順応なしでの色弁別閾値。矢印は順応方向を示す。

第 4 章

考察

図 4.1, 図 4.3, 図 4.5 はそれぞれ赤, 緑, 青の順応色での 3 つの順応条件の結果をまとめて $u'v'$ 色度図上にプロットしたもので, 図 4.2, 図 4.4, 図 4.6 は実験結果を縦軸に S, 横軸に L-2M をとってプロットし直したものである. これらは 3 つの順応条件の結果を比較して検討するためのものである.

4.1 考察 1: 順応色が赤, 青のときに見られる対称的な閾値の上昇

順応色が赤, 青のときに閾値上昇は順応方向だけではなく反対方向についても同程度の閾値上昇が見られた. もし, 反対色チャンネルが赤, 緑, 青, 黄で独立していたとしたら反対色の片方のみで順応したときに, 色弁別閾値は順応方向のみに上昇すると考えられるが, 実際はそうならなかった. このことから順応条件 1, 2 のような色交替順応刺激による順応では, 反対色の両方の色をほぼ同じように順応していると考えられる. この原因として, 赤い刺激が呈示されているときは応答を止め赤い刺激の呈示を止めると応答をするような反対色型細胞の存在が関係していると考えられる. 反対色型細胞では, 順応刺激が白から赤へ色交替して赤が呈示されているときは応答をせず, 順応刺激が赤から白へ色交替するときに応答をするというようなオフ応答をする. このような神経節応答が緑チャンネルにつながっており, それで白と赤の色交替刺激で順応した場合でも緑方向の閾値上昇が見られるという可能性がある. 他の赤, 青, 黄のチャンネルについても同様のことが考えられる. また, 赤-緑, 青-黄反対色チャンネルが対になっていて, 反対色のどちらの色で順応しても両方向の閾値

が上昇してしまうという可能性もある。これは、Krausopf や Webster らが取っている立場である。

あるいは、T 軸上では S 錐体, D 軸上では L, M 錐体のみで色弁別を行っているので、もし、錐体順応の影響が色交替刺激での順応にも現れているとしたら、錐体の感度低下に伴って軸上の両方向に閾値上昇が見られるとも考えられる。

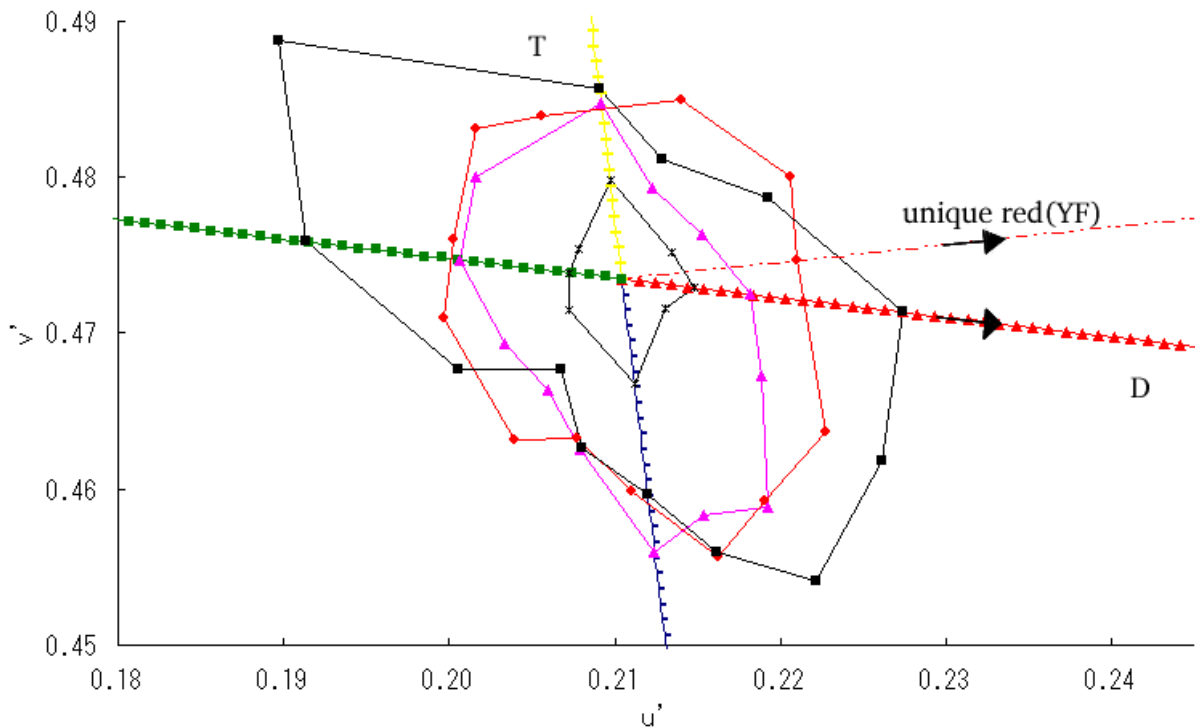


図 4.1 被験者 YF の順応色が赤のときの色弁別結果 (1)。縦に u' , 横に v' をとっている。図の破線は被験者 YF のユニーク赤である。▲: 順応条件 1 での順応後の色弁別閾値, ●: 順応条件 2 での順応後の色弁別閾値, ■: 順応条件 3 での順応後の色弁別閾値, * 順応なしでの色弁別閾値。矢印は順応方向を示す。

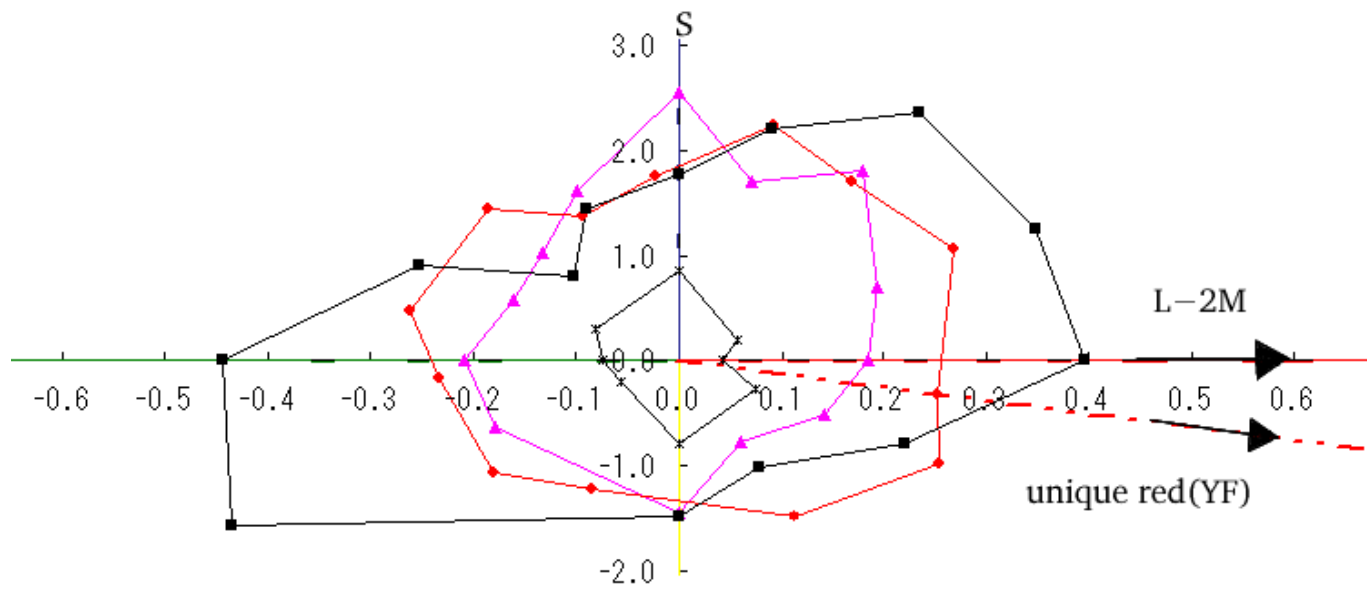


図 4.2 被験者 YF の順応色が赤のときの色弁別結果 (2). 縦軸に S, 横軸に L-2M をとっている. 図の破線は被験者 YF のユニーク赤である. ▲: 順応条件 1 での順応後の色弁別閾値, ●: 順応条件 2 での順応後の色弁別閾値, ■: 順応条件 3 での順応後の色弁別閾値, * 順応なしでの色弁別閾値. 矢印は順応方向を示す.

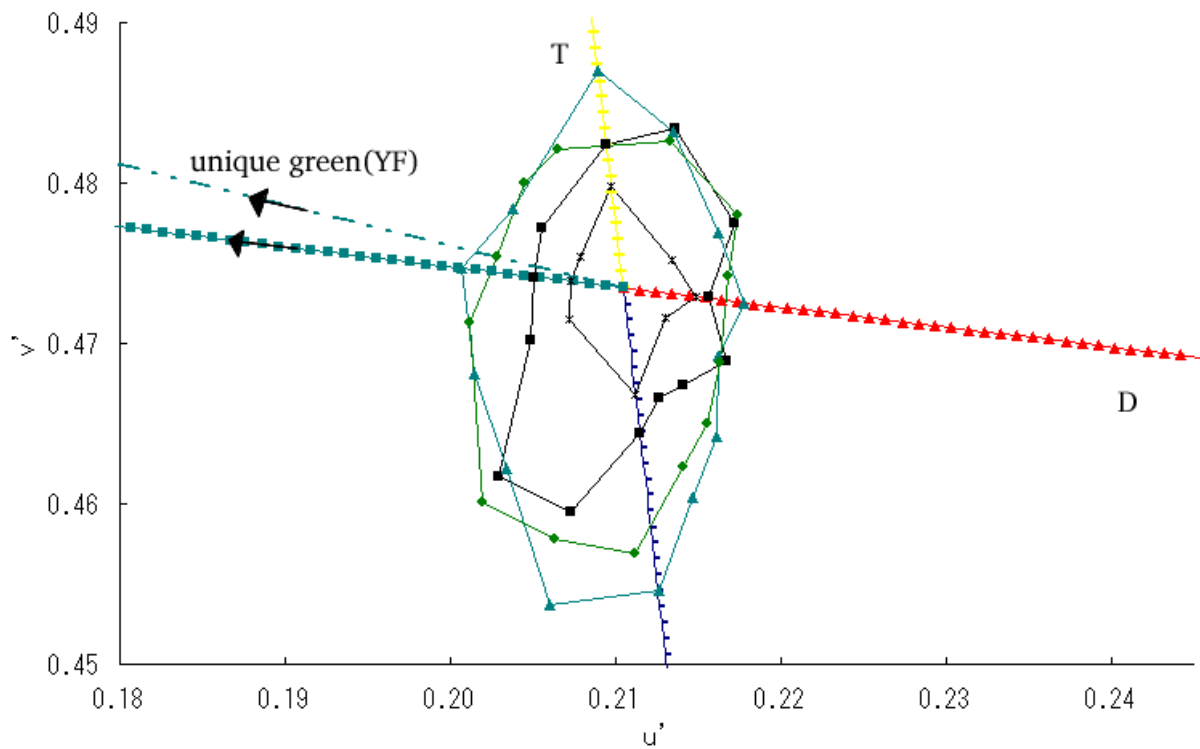


図 4.3 被験者 YF の順応色が緑のときの色弁別結果 (1). 縦軸に u' , 横軸に v' をとっている. 図の破線は被験者 YF のユニーク緑である. ▲: 順応条件 1 での順応後の色弁別閾値, ●: 順応条件 2 での順応後の色弁別閾値, ■: 順応条件 3 での順応後の色弁別閾値, * 順応なしでの色弁別閾値. 矢印は順応方向を示す.

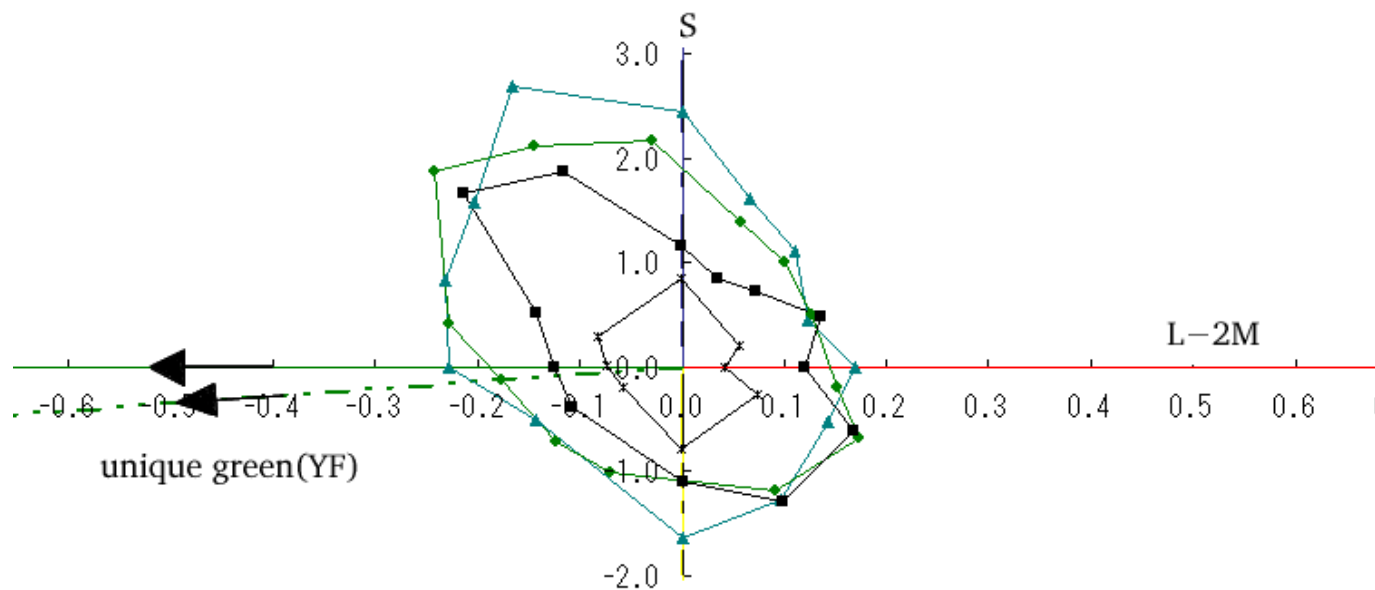


図 4.4 被験者 YF の順応色が緑のときの色弁別結果 (2). 縦軸に S, 横軸に L-2M をとっている. 図の破線は被験者 YF のユニーク緑である. ▲: 順応条件 1 での順応後の色弁別閾値, ●: 順応条件 2 での順応後の色弁別閾値, ■: 順応条件 3 での順応後の色弁別閾値, * 順応なしでの色弁別閾値. 矢印は順応方向を示す.

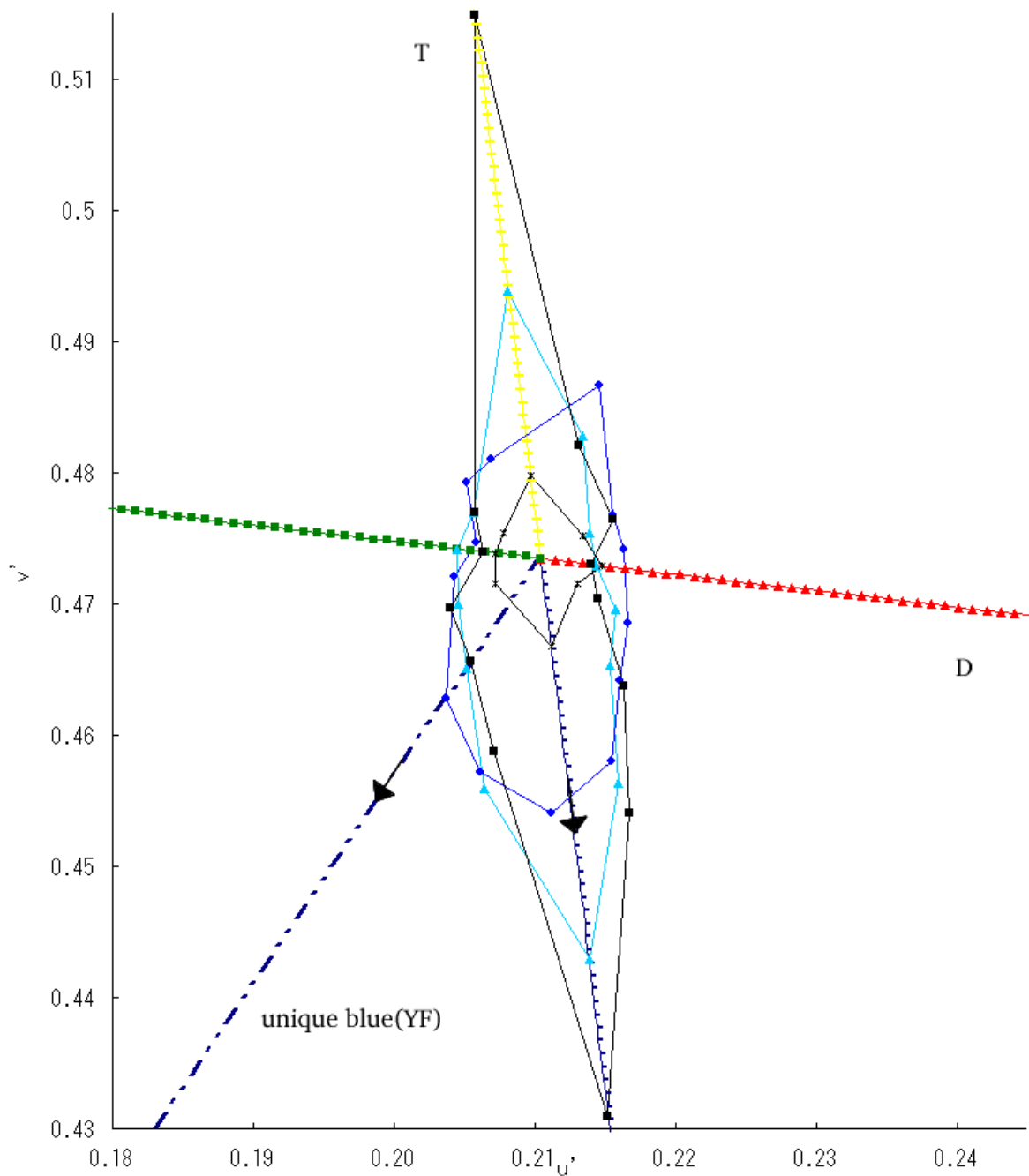


図 4.5 被験者 YF の順応色が青のときの色弁別結果 (1). 縦軸に u' , 横軸に v' をとっている. 図の破線は被験者 YF のユニーク青である. ▲: 順応条件 1 での順応後の色弁別閾値, ●: 順応条件 2 での順応後の色弁別閾値, ■: 順応条件 3 での順応後の色弁別閾値, * 順応なしでの色弁別閾値. 矢印は順応方向を示す.

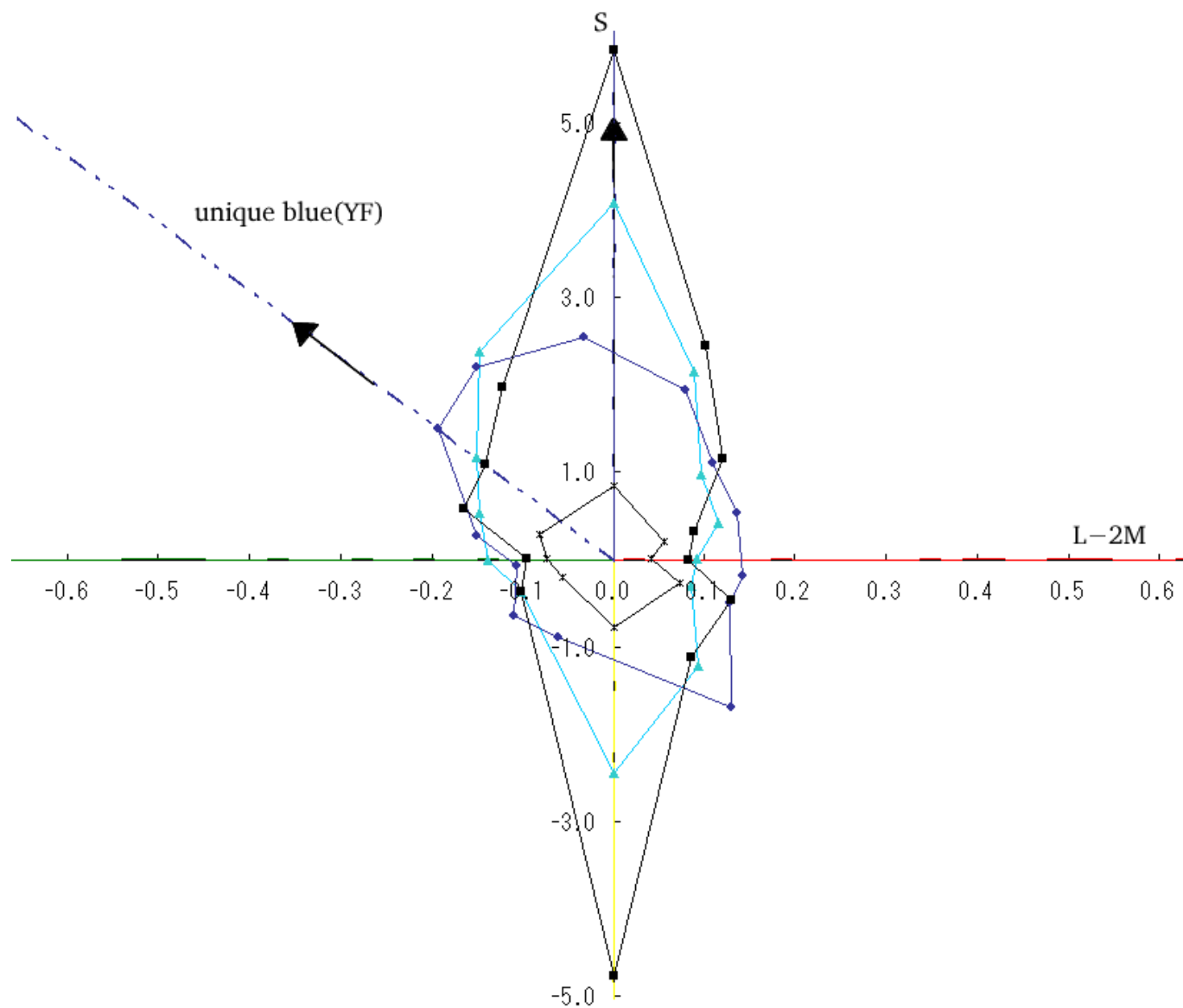


図 4.6 被験者 YF の順応色が青のときの色弁別結果 (2). 縦軸に S, 横軸に L-2M をとっている. 図の破線は被験者 YF のユニーク青である. ▲: 順応条件 1 での順応後の色弁別閾値, ●: 順応条件 2 での順応後の色弁別閾値, ■: 順応条件 3 での順応後の色弁別閾値, * 順応なしでの色弁別閾値. 矢印は順応方向を示す.

4.2 考察 2：選択的な閾値の上昇がみられる軸の傾き

青で順応した場合、閾値上昇は、順応を行った T 軸に沿って大きくなっている。T 軸上での色弁別は S 錐体のみで行われるので、この軸に沿って閾値上昇が大きくなり、その垂直方向の軸において閾値上昇がほとんど見られないということは、青での順応を行った場合は、S 錐体のみに影響を与えており、L、M 錐体への影響は無いと考えられる。赤、緑で順応した場合の閾値上昇は、青で順応を行った場合のように、順応した軸に沿って大きくなるのではなく、順応を行った D 軸よりも T 軸の方に傾いた軸に沿って大きくなっている。これは、赤、緑での順応の場合には L、M 錐体だけではなく S 錐体にも影響を与えており、そのために D 軸に沿って閾値上昇が大きくなるのではなく、T 軸よりの軸で閾値上昇が大きくなっているのではないかと考えられる。

また、順応条件 1 の錐体混同色線上の色での順応と、ユニーク色での順応の閾値上昇の傾向に大きな差は見られず、閾値上昇の大きくなる軸の傾きの差異も、錐体混同色線とユニーク色の軸の傾きの差異程度しか見られなかったということから、色の見えは色順応にたいした影響を与えていないと考えられる。

4.3 考察 3：定常順応での閾値の大幅な上昇

順応条件 3 で順応色が赤と青のときは閾値の上昇が大きくなっているが、順応色が緑のときは閾値上昇が他の順応条件のときの結果とあまり変わっていない。これは、今回の順応に用いた緑の彩度が赤や青の彩度に比べて低かったために十分な閾値上昇が見られなかったのではないかと考えられる。赤、青の順応の場合は、順応条件 1, 2 の白 ↔ 赤, 白 ↔ 青の色交替刺激に比べて錐体への刺激が大きく、そのため他の順応条件に比べて閾値上昇が大きくなったと考えられる。

4.4 考察4：反対色チャンネルの独立性の検討

今回の結果からは反対色チャンネルが赤、緑、青、黄の独立したものなのかどうかを判断する明らかな結果は出なかった。この理由として、急激な色交替、例えば、白から赤への急激な色交替のときには赤チャンネルを刺激し、赤から白への急激な色交替のときには反対の緑チャンネルを刺激している可能性がある。このことについて検討するために、順応刺激を今回用いた色交替のものから図 4.7 のような鋸上のものや、図 4.8 のようなサイン波状のものを用いて色交替時の順応色とは反対の色チャンネルへの影響を取り除いた実験を今後行う必要があるだろう。

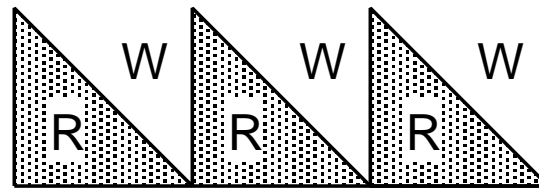


図 4.7 鋸状波の順応刺激。白 → 赤への色交替と赤 → 白へのゆるやかな変化をする刺激

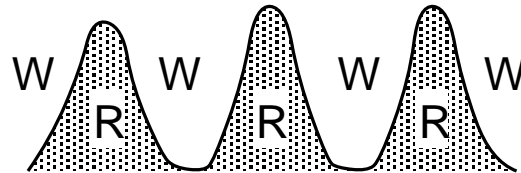


図 4.8 サイン波状の順応刺激。ある軸上で白 ↔ 赤をなだらかに変化させる刺激

第 5 章

結論

今回の実験の結果では、軸に沿って、順応した方向だけでなく、順応した方向と反対方向にも閾値上昇が見られた。このことより、反対色チャンネルは赤-緑、青-黄がそれぞれ対になっているか、色交替刺激を用いた順応では、反対色チャンネルの赤、緑、青、黄チャンネルを分離するのに十分では無かったという 2 つの可能性が考えられる。

順応後の色弁別閾値は T 軸上の順応では、その軸に沿って選択的に順応したが、D 軸上の順応やユニーク色の順応では、順応を行った軸よりも T 軸よりの軸でやや選択的な閾値の上昇を示した。T 軸上以外の順応での軸のずれは、赤、緑での順応を行った場合は、S 錐体が寄与しているために T 軸の方に傾いた軸に沿って閾値上昇が大きくなると考えられる。ユニーク色での順応後の閾値上昇の傾向が、錐体軸上の点での順応後の閾値上昇の傾向と似ているということは、色の見えに含まれる色みの影響はほとんどないということを示唆している。また、定常刺激による順応を赤、青で行ったときの閾値の上昇が色交替刺激による順応よりも大きいのは、定常刺激では、他の 2 つの順応に比べて錐体への刺激が大きいためであると考えられる。

今後は、順応刺激を、単純な色交替刺激から鋸状のものや、サイン波状のものにすることによって、色交替時の反対色型細胞のオフ応答の影響を受けずに色順応を行うことが出来るのではないかと考えられる。

謝辞

この実験に被験者として参加してくださった東野泰幸様，日本視覚学会 2001 冬期大会におきましてさまざまな御助言を頂いた先生方，実験で使用した液晶プロジェクタをお借りした高知工科大学情報システム工学科の福本昌弘講師，そして指導教員であり，本実験について一から御指導頂いた高知工科大学情報システム工学科の篠森敬三助教授に心から感謝します。

また，この研究は，日本学術振興会科学研究費基盤研究 (C)(10835026) の研究費支援を受けました。

参考文献

- [1] J. Krausopf, D. R. Williams and D. W. Heeley : “Cardinal directions of color space, ” *Vision Research*, 22(1982) 1123-1131.
- [2] M. A. Webster and J. D. Mollon : “Change in color appearance, ” *Nature*, 349(1991) 235-238.
- [3] K. Shinomori, L. Spillmann and J. S. Werner : “S-cone signals to temporal OFF-channels, asymmetrical connections to postreceptoral chromatic mechanisms, ” *Vision Research*, 39(1982) 39-49.
- [4] 栗木 一郎 : “色恒常性の神経計算理論, ” *光学*, 28(1999) 232-241.
- [5] 「視覚情報処理ハンドブック」, 日本視覚学会編, 朝倉書店, 2000.
- [6] 内川 恵二, 「色覚のメカニズム」, 朝倉書店, 1998.