

平成 14 年度
修士学位論文

時間的な等輝度色変化刺激を用いた R-G
チャンネルの独立性の検討

Possible Independence of Red and Green Chromatic
Channels Investigated with Temporally-Modulated
Chromatic Stimuli

1055113 深田 良尚

指導教員 篠森 敬三

2003 年 1 月 31 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報システム工学コース

要 旨

時間的な等輝度色変化刺激を用いた R-G チャンネルの独立性の 検討

深田 良尚

現在我々がテレビやディスプレイから得ている色情報は、必ずしも人間の知覚に対応したものではない。これは、これらの表示装置が、必ずしも人間の色覚メカニズムに合わせて作られたものではないからである。従って、より正確な色情報を得るためには、これらの表示装置を人間の色覚のメカニズムに近いものにする必要がある。そのためには、色覚メカニズムを正確に把握し、それをモデル化し応用可能にすることが重要である。

人間の色情報処理は、網膜上の3種の錐体、錐体以降の反対色チャンネル、更に高次のレベル(脳)の3段階で説明されている。反対色チャンネルには、R(赤)-G(緑)、Y(黄)-B(青)チャンネルがあり、それらはそれぞれ、3種類の錐体からの入力(和や差)を取って応答する。例えば R-G チャンネルでの応答は、L、M 錐体からの入力(差)を取って $L-2M$ のように表され、これが正の場合は R、負の場合は G を知覚する。このように R-G チャンネルは、R と G の極性が異なるだけの単一なメカニズムとして説明されている。しかし、R と G が異なるメカニズムであるという説もあり、R-G が対になった単一なメカニズムなのか、それとも、R、G が異なるメカニズムなのかは明らかではない。反対色メカニズムの独立性を知ることは、人間の色覚メカニズムをモデル化する場合の予測の正確性に大きく影響するため、実用的にも重要なことである。そこで、R、G チャンネルが独立かどうかを検討するために、色順応後の色弁別閾値を調べた。もし、R、G チャンネルが独立ならば、赤で順応したときは R チャンネルが、緑で順応したときは G チャンネルがより強く順応して、順応した色方向の色弁別閾値が大きく上昇すると考えられる。

R, G チャンネルを別々に順応するために, 最初に, 白色と順応色 (赤, 緑) が 0.5Hz で色交替する刺激 (矩形波順応刺激) を用いた. しかし, この順応刺激では, 順応色から白色へ色交替するときに, 時間的 OFF 応答の影響により, 順応した色方向とは反対方向も順応してしまう可能性があった. そこで, 時間的 OFF 応答の影響を少なくするために, 順応色から白色への色度変化がなだらかな刺激 (ON 鋸波状順応刺激) を用いた実験を行った. 逆に, 時間的 OFF 応答の影響を見るために, ON 鋸波状順応刺激とは逆の時間的な色度変化を持つ刺激 (OFF 鋸波状順応刺激) を用いた. これらの順応刺激の他に, 錐体レベルでの順応効果を見るために時間的に色度変化をしない定常光順応刺激も用いた. これらの順応刺激の輝度は全て $2000\text{cd}/\text{m}^2$ で一定であった. テスト刺激には, サイン波状に色度変化する刺激 (サイン波テスト刺激), ON 鋸波状と同じような色度変化をする刺激 (ON 鋸波状テスト刺激) と, それと反対の変化をする刺激 (OFF 鋸波状テスト刺激) を用いた. 実験はこれらの順応刺激とテスト刺激を組み合わせて行われた.

この実験の結果, 順応色が赤の場合は, 赤方向の閾値の方が緑方向の閾値よりも大きく上昇する非対称な閾値上昇が見られたが, 順応色が緑の場合は, その非対称性があまり見られなかった. この結果は, R チャンネルが G チャンネルに対して独立である可能性を示唆している.

キーワード R-G チャンネル, ON 鋸波状順応刺激, OFF 鋸波状順応刺激

Abstract

Possible Independence of Red and Green Chromatic Channels Investigated with Temporally-Modulated Chromatic Stimuli

Yoshinao Fukada

The color information from the display or television doesn't suit to a human perception, because these displays were not made as suiting a human color vision mechanism. In order to catch the correct information from these displays, it is necessary that they are suited to the human color vision mechanisms. Thus, it is important for us to understand the human color vision mechanism correctly and make the model that is practicable.

Color information processing of human is explained by the three stages. First stage is three types of cones in the retina. Second stage is the opponent color channels after cones. Final stage is mechanisms in higher levels in human brain. R(Red)-G(Green) and Y(Yellow)-B(Blue) opponent-color channels receive input from three types of cones and they respond sum or subtraction of the input. For example, the response of R-G channel is expressed by $L-2M$ that is the subtraction between input from L and M cone. Humans perceive red when $L-2M$ is plus, and green when it is minus. R-G channel is explained as a single mechanism that is only different between a polarity of R and G; however, there is the opinion that R and G channels are different. It is not figured out whether R and G channels are independent of each other or not. It is important to understand the independence of opponent-color mechanisms, because understanding the mechanisms affects the presupposing of making a model of human color vision

mechanisms. We study color discrimination thresholds after a chromatic adaptation in order to investigate this issue. If R and G channels are independent of each other, then it is thought that following. Because R channel adapts strongly more than G when they are adapted by red adaptation stimuli, so the threshold of red direction increases largely more than green direction. And the threshold of green direction increases largely when they are adapted by green.

For that purpose, first we used the stimulus which changes chromatically between white and adaptation color (red or green) (Square-wave adaptation stimulus) at 0.5 Hz in order to adapt R and G channels differently. It might be the case, however, this stimulus adapts not only the color direction of adaptation, but also the opposite direction by the influence of temporal OFF response when the chromatic changed from adaptation color to white rapidly. We used the stimulus that had gradual chromatic modulation from adaptation color to white (ON sawtooth-wave adaptation stimulus) in order to reduce the influence of OFF response. Conversely, a stimulus that had temporal chromatic modulation opposite to ON stimulus (OFF sawtooth-wave adaptation stimuli) was used in order to look into the influence of OFF response. We also used the constant adaptation stimulus which in chromaticity was used to investigate to a stronger adaptation effect at cone level. All adaptation stimuli were in equal-luminance at 2000 cd/m^2 . As test stimuli, we used the stimulus which had sinusoidal chromatic modulation (Sine-wave test stimulus), ON sawtooth test stimulus and OFF sawtooth test stimulus. The experiments were made by combining these adaptation and test stimuli.

When the adaptation color was red, it was shown that an elevation of threshold of red direction was larger than that of green. This asymmetrical elevation of threshold strongly suggests that the R and G channels are independent of each other.

key words Red-Green channel, ON sawtooth-wave adaptation stimuli, OFF sawtooth-wave adaptation stimuli

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	4
第 2 章	実験方法	7
2.1	実験装置 (Apparatus)	7
2.2	被験者 (Observers)	8
2.3	順応刺激 (Adaptation stimuli)	8
2.3.1	順応刺激 1: 矩形波順応刺激	10
2.3.2	順応刺激 2: 定常光順応刺激	10
2.3.3	順応刺激 3: ON 鋸波状順応刺激	11
2.3.4	順応刺激 4: OFF 鋸波状順応刺激	12
2.4	テスト刺激 (Test stimuli)	12
2.4.1	テスト刺激 1: サイン波テスト刺激	14
2.4.2	テスト刺激 2: ON 鋸波状テスト刺激	14
2.4.3	テスト刺激 3: OFF 鋸波状テスト刺激	15
2.5	実験条件	15
2.6	測光	16
2.6.1	プロジェクタの測光	16
2.6.2	ディスプレイの測光	17
2.7	実験手順 (Procedure)	17
第 3 章	実験結果	19

3.1	各実験における結果	19
3.1.1	実験 1 : 順応刺激 1(矩形波順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺)	20
3.1.2	実験 2 : 順応刺激 2(定常光順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺)	23
3.1.3	実験 3 : 順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺)	25
3.1.4	実験 4 : 順応刺激 4(OFF 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺)	28
3.1.5	実験 5 : 順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 2(ON 鋸波状テスト刺)	30
3.1.6	実験 6 : 順応刺激 4(OFF 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 2(ON 鋸波状テスト刺)	35
3.1.7	実験 7 : 順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 3(OFF 鋸波状テスト刺)	39
3.1.8	実験 8 : 順応刺激 4(OFF 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 3(OFF 鋸波状テスト刺)	44
3.2	赤方向と緑方向の色弁別閾値の比較	48
第 4 章	考察	55
4.1	OFF 応答の影響による反対色方向への順応効果の有無	55
4.2	定常光順応刺激での閾値上昇の傾向	56
4.3	ON 鋸波状テスト刺激と OFF 鋸波状テスト刺激の閾値上昇の比較	57
4.4	順応色が赤のときの閾値上昇の非対称性	57
4.5	順応色が緑のときの閾値上昇	60
4.6	今後の課題	62
第 5 章	結論	65

目次

謝辞	67
参考文献	69
付録 A 生理学的知見	71
付録 B 有意差の求め方	73

目次

1.1	3 錐体の分光感度関数	2
1.2	色覚モデル	3
1.3	Krauscopf の実験で用いられたテスト方向	5
1.4	順応後の閾値の変化	5
1.5	順応刺激の時間的な色度変化の例 (R の場合)	6
2.1	実験装置	8
2.2	順応刺激の呈示方法	9
2.3	$u'v'$ 色度図上での順応軸と順応色	9
2.4	順応刺激 1 の時間的な色度変化 (R の場合)	10
2.5	順応刺激 2 の時間的な色度変化 (R の場合)	11
2.6	順応刺激 3 の時間的な色度変化 (R の場合)	11
2.7	順応刺激 4 の時間的な色度変化 (R の場合)	12
2.8	テスト刺激の呈示方法	13
2.9	色弁別を行う色方向	13
2.10	閾値でのテスト刺激の時間的な変化 (R 方向の場合)	14
2.11	閾値でのテスト刺激の時間的な変化 (R 方向の場合)	15
2.12	閾値でのテスト刺激の時間的な変化 (R 方向の場合)	15
2.13	オパール拡散ガラス上の測光点	17
2.14	ディスプレイの測光点	17
2.15	実験の流れ	18
3.1	矩形波順応刺激-サイン波テスト刺激のときの色弁別閾値, $u'v'$ 色度図でのプロット (左) と錐体出力軸でのプロット (右)	20

3.2	被験者 YF の実験 1 での色弁別閾値 (順応色赤)	21
3.3	被験者 YF の実験 1 での色弁別閾値 (順応色緑)	21
3.4	被験者 MH の実験 1 での色弁別閾値 (順応色赤)	22
3.5	被験者 MH の実験 1 での色弁別閾値 (順応色緑)	22
3.6	被験者 YF の実験 2 での色弁別閾値 (順応色赤)	23
3.7	被験者 YF の実験 2 での色弁別閾値 (順応色緑)	24
3.8	被験者 MH の実験 2 での色弁別閾値 (順応色赤)	24
3.9	被験者 MH の実験 2 での色弁別閾値 (順応色緑)	25
3.10	被験者 YF の実験 3 での色弁別閾値 (順応色赤)	26
3.11	被験者 YF の実験 3 での色弁別閾値 (順応色緑)	26
3.12	被験者 MH の実験 3 での色弁別閾値 (順応色赤)	27
3.13	被験者 MH の実験 3 での色弁別閾値 (順応色緑)	27
3.14	被験者 YF の実験 4 での色弁別閾値 (順応色赤)	28
3.15	被験者 YF の実験 4 での色弁別閾値 (順応色緑)	29
3.16	被験者 MH の実験 4 での色弁別閾値 (順応色赤)	29
3.17	被験者 MH の実験 4 での色弁別閾値 (順応色緑)	30
3.18	被験者 YF の実験 5 での色弁別閾値 (順応色赤)	31
3.19	被験者 YF の実験 5 での色弁別閾値 (順応色緑)	31
3.20	被験者 MH の実験 5 での色弁別閾値 (順応色赤)	32
3.21	被験者 MH の実験 5 での色弁別閾値 (順応色緑)	32
3.22	被験者 SI の実験 5 での色弁別閾値 (順応色赤)	33
3.23	被験者 SI の実験 5 での色弁別閾値 (順応色緑)	33
3.24	被験者 RO の実験 5 での色弁別閾値 (順応色赤)	34
3.25	被験者 RO の実験 5 での色弁別閾値 (順応色緑)	34
3.26	被験者 YF の実験 6 での色弁別閾値 (順応色赤)	35
3.27	被験者 YF の実験 6 での色弁別閾値 (順応色緑)	36

目次

3.28	被験者 MH の実験 6 での色弁別閾値 (順応色赤)	36
3.29	被験者 MH の実験 6 での色弁別閾値 (順応色緑)	37
3.30	被験者 SI の実験 6 での色弁別閾値 (順応色赤)	37
3.31	被験者 SI の実験 6 での色弁別閾値 (順応色緑)	38
3.32	被験者 RO の実験 6 での色弁別閾値 (順応色赤)	38
3.33	被験者 RO の実験 6 での色弁別閾値 (順応色緑)	39
3.34	被験者 YF の実験 7 での色弁別閾値 (順応色赤)	40
3.35	被験者 YF の実験 7 での色弁別閾値 (順応色緑)	40
3.36	被験者 MH の実験 7 での色弁別閾値 (順応色赤)	41
3.37	被験者 MH の実験 7 での色弁別閾値 (順応色緑)	41
3.38	被験者 SI の実験 7 での色弁別閾値 (順応色赤)	42
3.39	被験者 SI の実験 7 での色弁別閾値 (順応色緑)	42
3.40	被験者 RO の実験 7 での色弁別閾値 (順応色赤)	43
3.41	被験者 RO の実験 7 での色弁別閾値 (順応色緑)	43
3.42	被験者 YF の実験 8 での色弁別閾値 (順応色赤)	44
3.43	被験者 YF の実験 8 での色弁別閾値 (順応色緑)	45
3.44	被験者 MH の実験 8 での色弁別閾値 (順応色赤)	45
3.45	被験者 MH の実験 8 での色弁別閾値 (順応色緑)	46
3.46	被験者 SI の実験 8 での色弁別閾値 (順応色赤)	46
3.47	被験者 SI の実験 8 での色弁別閾値 (順応色緑)	47
3.48	被験者 RO の実験 8 での色弁別閾値 (順応色赤)	47
3.49	被験者 RO の実験 8 での色弁別閾値 (順応色緑)	48
3.50	順応色が赤のときの赤方向と緑方向の閾値の取り方	49
3.51	被験者 YF の赤方向と緑方向の閾値 (順応色赤)	50
3.52	被験者 YF の赤方向と緑方向の閾値 (順応色緑)	50
3.53	被験者 MH の赤方向と緑方向の閾値 (順応色赤)	51

3.54	被験者 MH の赤方向と緑方向の閾値 (順応色緑)	51
3.55	被験者 SI の赤方向と緑方向の閾値 (順応色赤)	52
3.56	被験者 SI の赤方向と緑方向の閾値 (順応色緑)	52
3.57	被験者 RO の赤方向と緑方向の閾値 (順応色赤)	53
3.58	被験者 RO の赤方向と緑方向の閾値 (順応色緑)	53
4.1	順応刺激 2(定常光順応刺激) を用いた場合と順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激) を用いた場合の閾値上昇の傾向比較	56
4.2	単一なメカニズムのときの L, M 錐体からの入力による赤, 緑の処理経路	58
4.3	単一なメカニズムのときの応答関数	59
4.4	独立なメカニズムのときの L, M 錐体からの入力による赤, 緑の処理経路	60
4.5	独立なメカニズムのときの応答関数 1	60
4.6	独立なメカニズムのときの応答関数 2	61
A.1	神経節細胞の受容野の例	72
A.2	受容野の応答	72
B.1	統計解析を行う点	73

表目次

4.1 順応色赤と緑のときの錐体刺激の変化量	62
B.1 各実験における赤方向と緑方向の閾値での有意差の有無	74

第 1 章

はじめに

現在我々がテレビやディスプレイから得ている色情報は、必ずしも人間の知覚に対応したものであるのではない。例えば、ディスプレイ上に表示された画像と実際のものを比較すると全く違う色に見えるという事がよくある。これは、これらの表示装置が、必ずしも人間の色覚メカニズムに合わせて作られたものではないからである。従って、より正確な色情報を得るためには、これらの表示装置を人間の色覚のメカニズムに近いものにする必要がある。そのためには、色覚メカニズムを正確に把握し、それをモデル化し応用可能にすることが重要である。

次に、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、詳細な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、それぞれの分光感度がオーバーラップすることによって人間は異なる波長の光を異なる色として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であるのでこの名前が付けられている。

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 3 種類の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

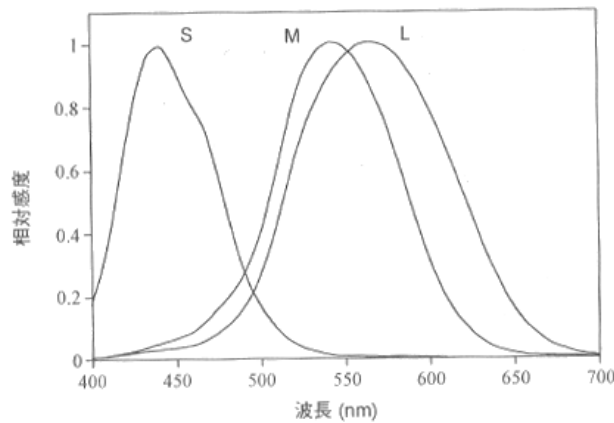


図 1.1 3 錐体の分光感度関数．各関数は最大値を 1 に正規化してある．（「色覚のメカニズム」[1] より）

ている．

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，青と黄をそれぞれ同時に監察することができないので，赤と緑，青と黄をそれぞれ反対色の関係にあると言う．図 1.2 で示される第 2 ステージの赤-緑（以降は R-G とする）の応答は L, M, S, 3 種の錐体からの応答を取って $L-2M$ や $L-2M+0.05S$ のように表される．このとき $L-2M$ や $L-2M+0.05S$ が正の時は赤の，負の時は緑の応答をするとされている．

黄-青（以降は Y-B とする）反対色チャンネルでは 3 種の錐体からの応答を取って $(L+M)-S$ と表され， $(L+M)-S$ が正の時は黄の，負の時は青の応答をするとされている．しかし，これらの R-G, Y-B チャンネルが赤 (R), 緑 (G), 黄 (Y), 青 (B) の反対色がそれぞれ対になった R-G, Y-B の 2 つのメカニズムなのか，それとも R, G, Y, B がそれぞれ独立した 4 つのメカニズムなのかは明らかではない．

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．

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

1.2 色順応

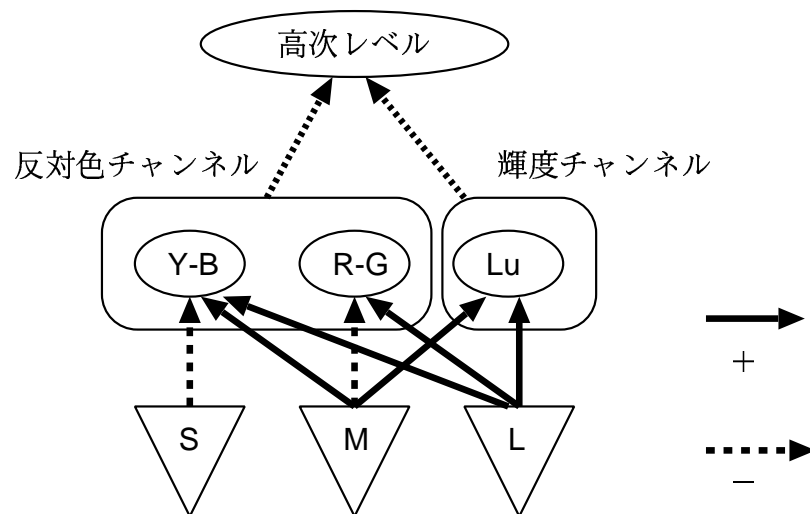


図 1.2 色覚モデル．錐体からの反対色応答への変換モデルを示す一般的な色覚モデル．（「色覚のメカニズム」より）

1.2 色順応

色順応とは、ある同じ色を見続けると、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錐体レベルでの選択的な感度変化によって生じると考えられている。色順応時の3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。

このように色順応は3錐体の選択的な感度変化によって説明されていたが、現在では錐体よりも高次のレベル（反対色チャンネル等）でも色順応が生じているとされている。

1.3 実験目的

錐体以降のレベルの反対色チャンネルについて調べた実験として Krauscopf らのものがある [2] . 彼らは色順応後の色弁別^{*1}を行う手法を用いた . 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り , 彼等はこれらの軸に沿って色度変化する順応刺激を用いて色順応を行った . これらの順応刺激は , P_1 の軸を色順応に用いた場合は青と黄の間を , P_2 の軸を色順応に用いた場合は赤と緑の間をなだらかに色度が変化するような刺激光である .

図 1.4 は Krauscopf らの実験の結果である . 左は P_1 の軸 (縦軸) に沿って順応したときの結果 , 右は P_2 の軸 (横軸) に沿って順応したときの結果である . この結果では , 色弁別閾値は色順応に用いた軸に沿って上昇している . また , 輝度変化する順応刺激について行った実験でも同様の結果が得られたことから , Krauscopf 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 . それらはそれぞれ , 輝度 , 赤-緑 (R-G) , 黄-青 (Y-B) 軸である . 彼等は , このように特定の軸に沿って順応したときに選択的な閾値上昇を示すという結果は , R-G , Y-B の 2 つの反対色チャンネルが存在することを支持している . また , これらの反対色チャンネルが R-G , Y-B が単一のものではなく , R , G , Y , B がそれぞれ独立な 4 つのメカニズムになっているかもしれないとも言っている .

このような反対色メカニズムの独立性を知ることは , 人間の色覚メカニズムをモデル化する場合の予測の正確性に大きく影響するため , 実用的にも重要なことである . そこで , 我々は反対色チャンネル , 特に R-G チャンネルが対になった単一のメカニズムなのか , それとも R , G がそれぞれ独立したメカニズムなのか^{*2}を色順応後の色弁別閾値を調べることによって検討した . もし , R-G チャンネルが単一のメカニズムならば , 赤と緑のどちらで順応をしても 'R-G チャンネル' が順応されて , 赤方向と緑方向の両方の色方向に対する色弁別能

^{*1} 色弁別とはある色と別の色を比べて二の色の違いを見分けることであり , 二の色の違いがぎりぎり見分けられるときの二の色の色差を色弁別閾値と言う .

^{*2} 神経節細胞レベルでは , 赤と緑で独立な応答をする細胞が存在するという生理学的知見があることから , それよりも高次のレベルでも赤と緑を別々に処理する経路が存在する可能性はあると考えられる . この生理学的知見に関しては付録 A を参照 .

1.3 実験目的

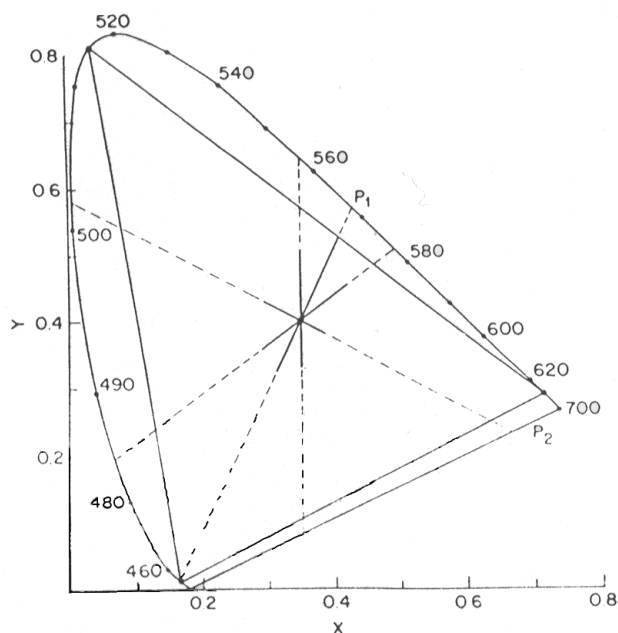


図 1.3 Krausopf の実験で用いられたテスト方向。(Krausopf,1982 より)

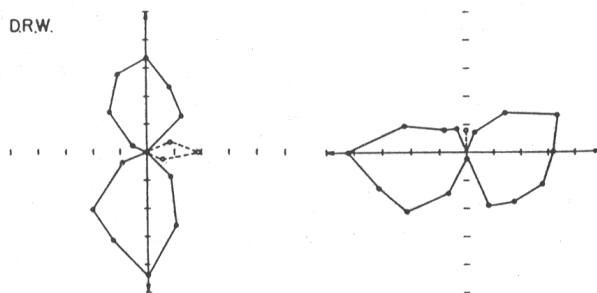


図 1.4 順応後の閾値の変化．赤-緑軸での順応(左)，青-黄軸での順応(右)(Krausopf, 1982 より)

力が低下し，両方の閾値が同程度上昇すると考えられる．逆にもし，R，Gチャンネルがそれぞれ独立なメカニズムならば，例えば赤で順応したときにはRチャンネルのみが順応し，Gチャンネルは順応しないので，赤方向の閾値が緑方向の閾値よりも明らかに大きくなると考えられる．

Krausopf や Webster[3] らは，順応刺激として，反対色の両方の色の間を変化するような刺激(例えば赤 ↔ 緑)を用いた．その実験の結果，赤方向と緑方向の閾値上昇は同程度であった．しかし，このような色度変化をする順応刺激は，もし，R，Gチャンネルがそれぞ

れ独立であったとしても，R，G 両方のチャンネルを順応してしまう可能性があり，R，G チャンネルを別々に順応するには不向きであると考えた．そこで，我々は，錐体混同色線上^{*3}の片方の色（赤 or 緑）と白色を時間的に等輝度色交替する矩形波順応刺激（図 1.5(左)）を順応刺激として用いた．また，定常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 [4] ことから，錐体レベルでの順応効果を見るために，色交替を行わず，同じ色（赤 or 緑）のみを呈示する定常刺激による色順応も行った．

実験の結果，矩形波順応刺激による順応後の閾値は，順応色が赤のときは赤方向の閾値が緑方向の閾値よりも大きくなり，順応色が緑のときは緑方向の閾値が赤方向の閾値よりも大きくなるという非対称な閾値上昇の結果を示した．この結果は R-G チャンネルが独立していることを示唆している．しかし，この実験で用いた矩形波順応刺激では，順応色（赤 or 緑）から白色へ色交替する時に反対色型細胞の OFF 応答の影響を受け順応を行った色方向だけでなく反対の色方向にも順応を行ってしまっている可能性があり，正確に R-G チャンネルの独立性を判断することができなかった．

そこで，この点を考慮するために，図 1.5(右) のように色交替時の OFF 応答の影響を無くすために矩形波刺激の OFF 部分（赤 or 緑 → 白）をなだらかに変化させるような時間的に鋸状の色度変化をする順応刺激を用いた．また，OFF 応答の影響も見るために図 1.5(右) で示す波形とは逆の波形の鋸波状順応刺激も用いた．

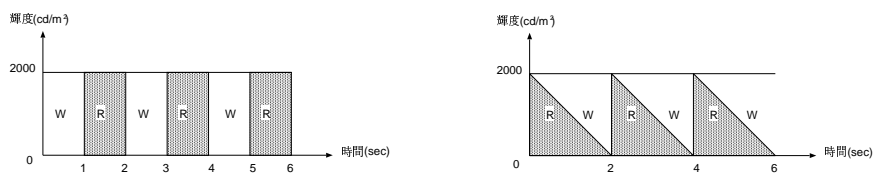


図 1.5 順応刺激の時間的な色度変化の例（R の場合）．左は以前の実験で用いた色交替刺激，右は今回の実験で用いた ON 鋸状波刺激である．

^{*3} 錐体混同色線とは L，M，S 錐体がない人にとって同じに見える色を色度図上にとっていくと現れる軌跡のことである．

第 2 章

実験方法

2.1 実験装置 (Apparatus)

図 2.1 は今回の実験で使用された実験ブースを真上から見た図である。ブースは縦 90cm 、横 290cm 、高さが 180cm であり、周りを暗幕と黒い板で覆って遮光した。被験者は図の位置で椅子に座り、顎台に顎を乗せて顔の位置を固定して実験を行った。顔の位置を固定した状態での被検者の眼からディスプレイ面までの距離は 133.86cm であった。

順応刺激は光源として液晶プロジェクタ (NEC VL-1000) を使用し、以下のような光学系を通過して被検者に呈示された。まず、プロジェクタからの光 (図の点線) はレンズ 1(L1) で平行光にされ、レンズ 2(L2) で集光される。L2 で集光された光は電磁シャッター (Sh) を通り、レンズ (L3) によって再び平行光に戻されて熱線吸収フィルタ (F)、オパール拡散ガラス (O)、ビームスプリッタ (BS) を通過して被検者の右眼に入る。図の点線のように BS を通り抜けて直進した余分な光は暗箱に入り被験者には見えないようにした。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プロジェクタからの光を完全に遮断した。テスト刺激の呈示用ディスプレイとして Barco monitor(Model CCID-121) を使用した。ディスプレイはディスプレイ面以外の部分が見えないように黒いカバーを掛けた。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 Reserch Systems) によって行われた。また、本実験制御用のプログラム言語として Turbo Pascal7.0 を用いた。

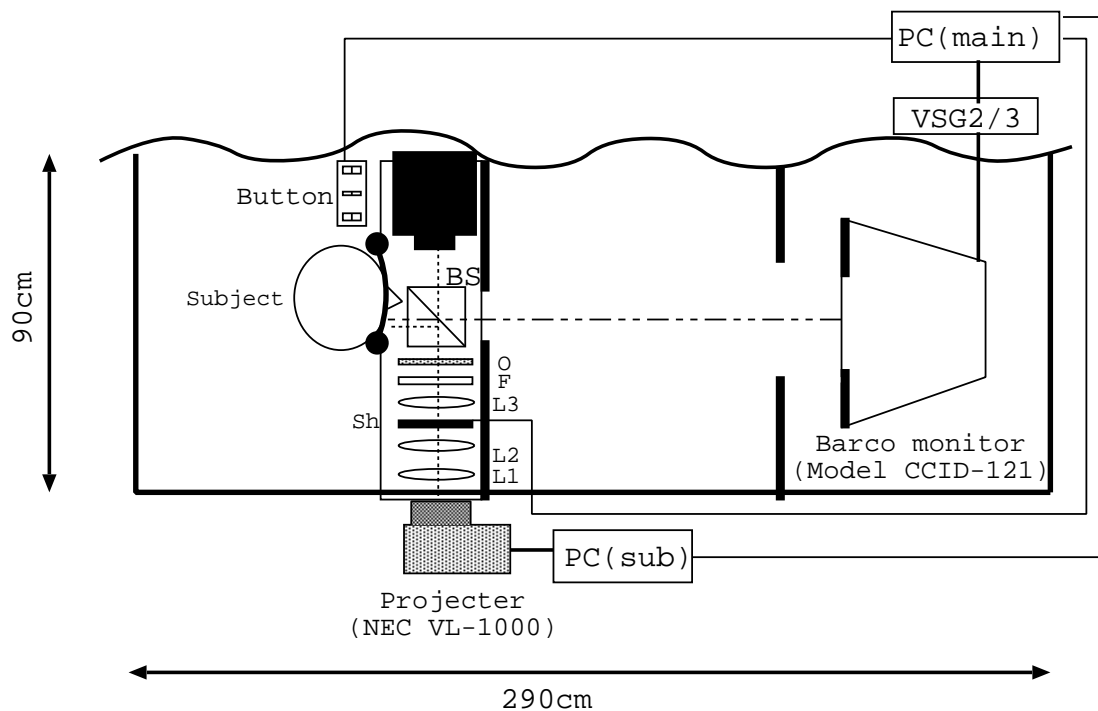


図 2.1 実験装置 . L1 , L2 , L3 : レンズ , O : オパール拡散ガラス , F : 熱線吸収フィルタ , Sh : シャッタ , BS : ビームスプリッタ

2.2 被験者 (Observers)

被験者は 24 歳の男性 2 名 (YF, MH) , 30 歳の男性 1 名 (RO) と 20 歳の男性 1 名 (SI) 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ある。また、被験者 SI と RO は、この実験の目的に対してナイーブ*¹である。

2.3 順応刺激 (Adaptatin stimuli)

全ての実験において順応刺激は視覚 13.6° の正方形で、ビームスプリッタを通して図 2.2 のように被験者に呈示された。

図 2.3 で示すように $u'v'$ 色度図上で $(u',v')=(0.210,0.473)$ の白色点 W を通る第

*¹ 実験の目的などを知らされていないということ

2.3 順応刺激 (Adaptatin stimuli)

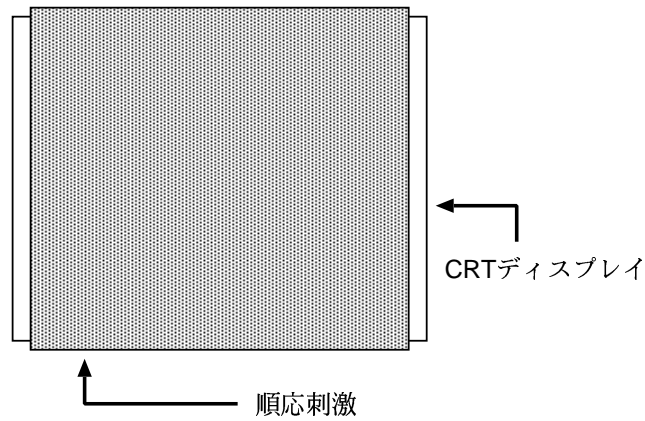


図 2.2 順応刺激の呈示方法

二色覚異常者の混同色線上の 2 点 R,G を順応色とし, その色度座標をそれぞれ $(u',v')=(0.369,0.454),(0.130,0.483)$ とした. 図 2.3 の直線は第二色覚異常者の混同色線*²を示しており, これを D 軸とした.

順応はこれら W,R,G の色度点と D 軸上の W と R, W と G の間の色度点を用いて行われた. また, D 軸上で W を中心に R 方向を赤方向, G 方向を緑方向, S 軸上で W を中心に上方向を青方向, 下方向を黄色方向とした.

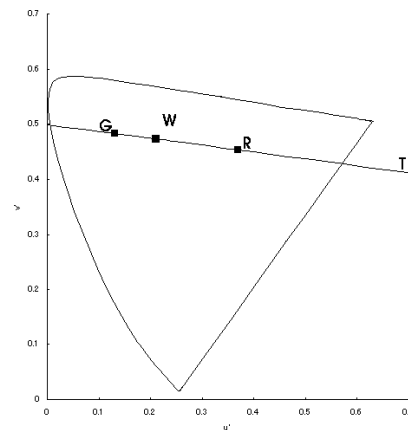


図 2.3 $u'v'$ 色度図上での順応軸と順応色. 横軸は u' , 縦軸は v' , 図の実線は D 軸を示している.

順応には以下に示すような 4 種類の時間的な色度変化の異なる順応刺激を用い, それらを

*² 第二色覚異常者の混同色線とは M 錐体を持たない人には同じ色に見える色度図上の直線のことである.

それぞれ順応刺激 1 ~ 4^{*3}とした。

2.3.1 順応刺激 1：矩形波順応刺激

順応刺激 1 には図 2.4 のように 0.5Hz で白色 (W) と順応色 (R or G) が $2000\text{cd}/\text{m}^2$ で等輝度色交代する矩形波刺激を用いた。

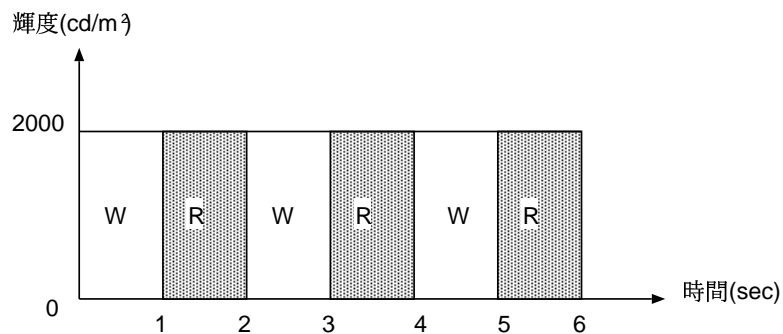


図 2.4 順応刺激 1 の時間的な色度変化 (R の場合) . 図の W とあるところは W が呈示されている状態で , R とある黒い部分は R が呈示されている状態を示している . 縦軸は輝度 (cd/m^2) で , 順応刺激の呈示中は $2000\text{cd}/\text{m}^2$ で一定である . 横軸は時間 (sec) である .

2.3.2 順応刺激 2：定常光順応刺激

順応刺激 2 では図 2.5 のように順応色 (R or G) を $2000\text{cd}/\text{m}^2$ で定常的に呈示し , 順応刺激 1 のような時間的な色度変化の無いものを用いた。

*3 被検者 SI,RO については順応刺激 1, 2 を用いた実験は行わなかった。

2.3 順応刺激 (Adaptatin stimuli)

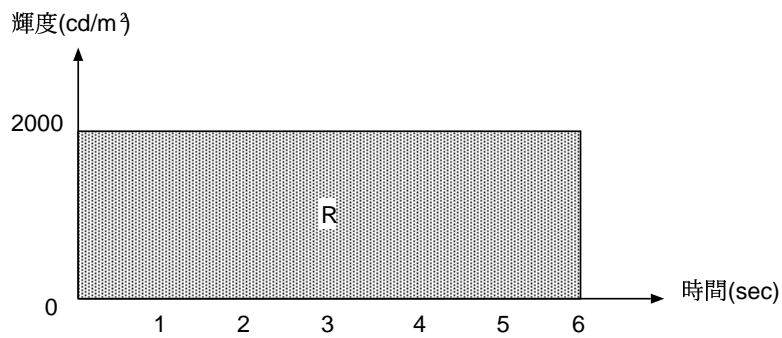


図 2.5 順応刺激 2 の時間的な色度変化 (R の場合) . R とある黒い部分は R が呈示されている状態を示している . この場合 R のみの定常呈示となる . 縦軸は輝度 (cd/m^2) で , 順応刺激の呈示中は $2000cd/m^2$ で一定である . 横軸は時間 (sec) である .

2.3.3 順応刺激 3 : ON 鋸波状順応刺激

順応刺激 3 には図 2.6 のように白色から順応色に急激に色度に変化し , 逆に順応色 (R or G) から白色 (W) へなだらかに変化する鋸波状の刺激を用いた . このときの色度は図 2.3 の D 軸上に沿って 0.5Hz で変化させた . このような色度変化をする刺激を ON 鋸波状順応刺激と呼ぶ .

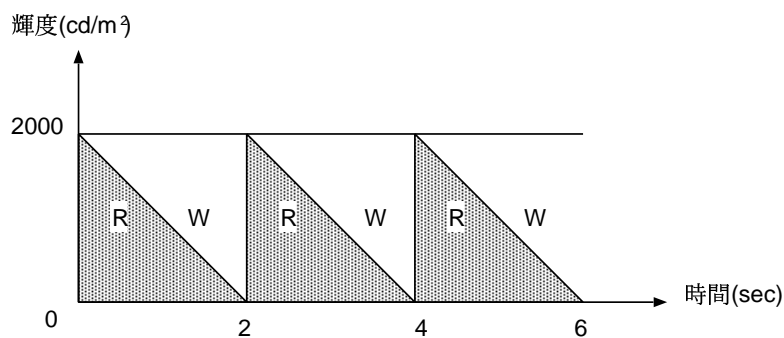


図 2.6 順応刺激 3 の時間的な色度変化 (R の場合) . 縦軸は輝度 (cd/m^2) で , 順応刺激の呈示中は $2000cd/m^2$ で一定である . 横軸は時間 (sec) である .

2.3.4 順応刺激 4 : OFF 鋸波状順応刺激

順応刺激 4 には図 2.7 のように順応刺激 3 とは逆の変化，すなわち白色 (W) から順応色 (R or G) へなだらかに色度が変化し，逆に順応色から白色に急激に変化する鋸波状の刺激を用いた．このときの色度は，順応刺激 3 と同様に図 2.3 の D 軸上に沿って 0.5Hz で変化させた．このような変化をする刺激を OFF 鋸波状順応刺激と呼ぶ．

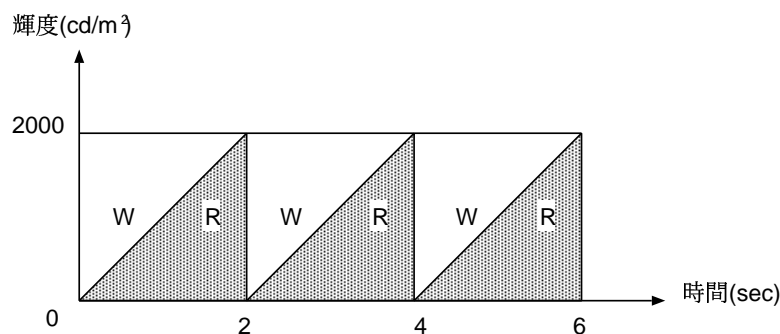


図 2.7 順応刺激 4 の時間的な色度変化 (R の場合)．縦軸は輝度 (cd/m^2) で，順応刺激の呈示中は $2000cd/m^2$ で一定である．横軸は時間 (sec) である．

2.4 テスト刺激 (Test stimuli)

色弁別を行うためのテスト刺激は，図 2.8 のように視角 $12^\circ \times 16^\circ$ のディスプレイ上に，固視点を中心として 4 箇所の中の 1 箇所にランダムに呈示される．このときテスト刺激は $10cd/m^2$ の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．

色弁別は図 2.9 で示されるように，白色点 W を中心として，順応色として用いた D 軸上の R, G 方向と，第 3 色覚異常者の混同色線^{*4}である T 軸上の 2 方向と，破線で示されている D 軸と T 軸の間の 4 方向の合計 8 方向について行った．テスト刺激は $u'v'$ 色度図上で 0.001 の距離を 1 ステップとした．

*4 第二色覚異常者の混同色線とは S 錐体を持たない人には同じ色に見える色度図上の線のことである．

2.4 テスト刺激 (Test stimuli)

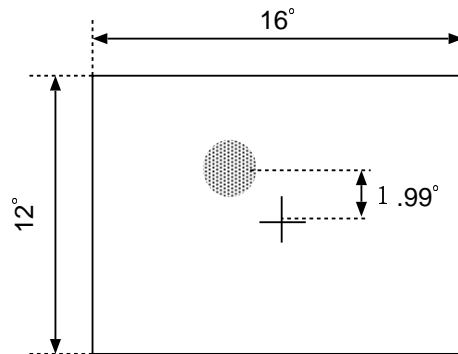


図 2.8 テスト刺激の呈示方法．図の中心は固視点で，黒い丸がテスト刺激を示す．テスト刺激の中心から固視点までは縦，横にそれぞれ視覚 1.99° ずつ離れている．

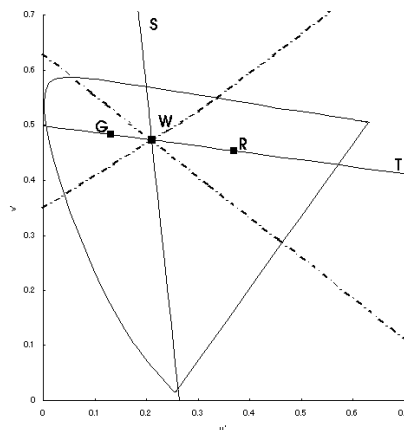


図 2.9 色弁別を行う色方向．図の実線は D 軸と T 軸の色方向を示し，破線はそれ以外の色方向を示す．

また，テスト刺激として，以下に示すような，時間的色度変化の異なる3種類のものを用いた．各テスト刺激は前述した4種類の順応刺激と組み合わせて用いられた．但し，テスト刺激2, 3については順応刺激3, 4による順応のときのみにもちいた．

2.4.1 テスト刺激1：サイン波テスト刺激

テスト刺激1は，呈示時間1秒で，図2.10で示すようにサイン波状に500msecでWからテスト方向に色度変化し，そこから500msecでWへ色度変化する．このときのテスト刺激の輝度は，ディスプレイの輝度と同じ $10\text{cd}/\text{m}^2$ で一定である．

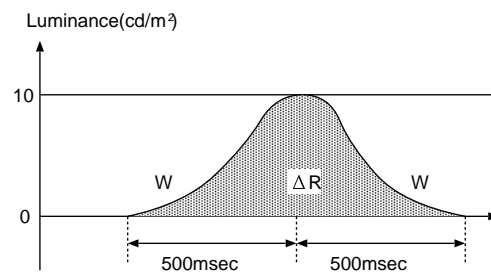


図 2.10 閾値でのテスト刺激の時間的な変化 (R 方向の場合)．図の縦軸は輝度，横軸は時間を示す． ΔR は弁別閾値を示す．

2.4.2 テスト刺激2：ON 鋸波状テスト刺激

テスト刺激2は，呈示時間1秒で，図2.11で示すように白色からテストする色方向に急に色度変化し，逆にテストする色方向から白色(W)へなだらかに変化する鋸波状の刺激を使用した．このときの色度は図2.9の各色方向に沿って変化させた．

2.5 実験条件

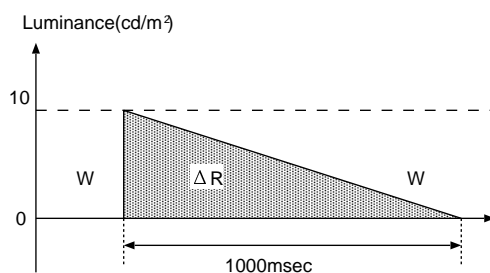


図 2.11 閾値でのテスト刺激の時間的な変化 (R 方向の場合) . 図の縦軸は輝度 , 横軸は時間を示す . ΔR は弁別閾値を示す .

2.4.3 テスト刺激 3 : OFF 鋸波状テスト刺激

テスト刺激 3 は , 呈示時間 1 秒で , 図 2.12 で示すようにテスト刺激 3 とは逆の変化 , すなわち白色 (W) からテストする色方向へなだらかに色度が増加し , 逆にテストする色方向から白色に急激に変化する鋸波状の刺激を用いた . このときの色度は図 2.9 の各色方向に沿って変化させた .

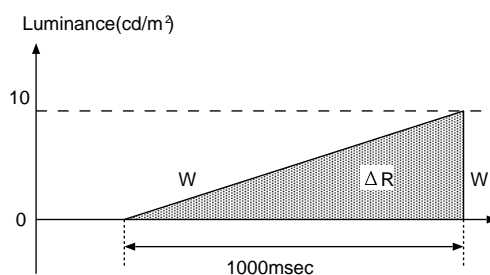


図 2.12 閾値でのテスト刺激の時間的な変化 (R 方向の場合) . 図の縦軸は輝度 , 横軸は時間を示す . ΔR は弁別閾値を示す .

2.5 実験条件

これらの順応刺激とテスト刺激を以下のように組み合わせて , 以下のような 8 通りの実験を行った . 実験毎に赤と緑の 2 色を順応色として用いた . 尚 , 実験 1 ~ 4 は被験者 YF と MH のみが行った .

実験 1：順応刺激 1(矩形波順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺激)

実験 2：順応刺激 2(定常光順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺激)

実験 3：順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺激)

実験 4：順応刺激 4(OFF 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺激)

実験 5：順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 2(ON 鋸波状テスト刺激)

実験 6：順応刺激 4(OFF 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 2(ON 鋸波状テスト刺激)

実験 7：順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 3(OFF 鋸波状テスト刺激)

実験 8：順応刺激 4(OFF 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 3(OFF 鋸波状テスト刺激)

2.6 測光

2.6.1 プロジェクタの測光

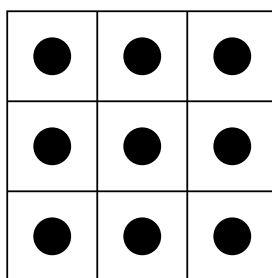
CT-1000(MINOLTA) を用いビームスプリッタを通してオパール拡散ガラス上の輝度を測光した。まず初めに CT-1000 を用いてプロジェクタの各 RGB 値における輝度と色度を測光した。このときの測光点は R, G, B 値の 0~500 を 20 ずつとった。R, G, B 値を 0~500 としたのは、この実験で順応刺激作成のためのプログラムにおいて、最大の出力が R, G, B それぞれ 504 としているためである。この測光の結果から、プロジェクタの γ 関数を求め順応色の輝度と色度点から必要な RGB 値の予測を行った。

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 2.13 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。

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

2.7 実験手順 (Procedure)



オパール拡散ガラス

図 2.13 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．

光を行い，必要な順応色の色度と輝度になるように RGB 値を決定した．

2.6.2 ディスプレイの測光

ディスプレイは LS-100(MINOLTA) と CT-1000(MINOLTA) を用いて，ビームスプリッタを外した場合と着けた場合の両方で行った．測光は図 2.14 のようにディスプレイ上の 4 箇所で行った．

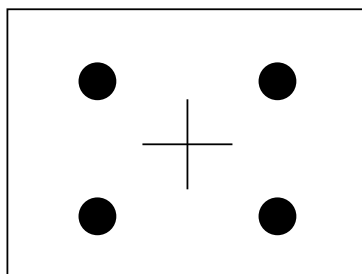


図 2.14 ディスプレイの測光点．点は測光したポイントとサイズ (直径 2°) を示す

2.7 実験手順 (Procedure)

実験は図 2.15 の流れで行われた．

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．5 分間の前順応の後にピープ音が鳴り，被験者が手元のボタンを押すと手順 3 に進む．手順 3 では 6 秒間の色順

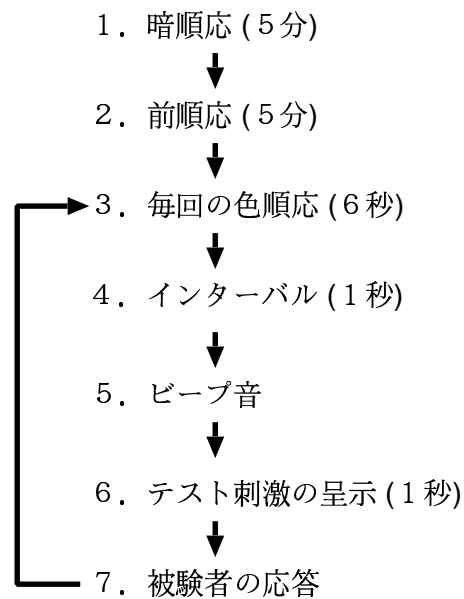


図 2.15 実験の流れ．手順 3～7 は弁別閾値が決定するまで繰り返す．

応を行う．この色順応は順応状態を維持するために行ったものである．但し，色順応を行わずに色弁別を行う場合はこの手順は行わない．6 秒間の色順応の後に 1 秒間のインターバルにおいてビープ音が鳴り，テスト刺激が 1 秒間呈示される．テスト刺激呈示が終了すると再びビープ音が鳴ってテスト刺激呈示の終了を知らせる．被験者はテスト刺激呈示の終了のビープ音の後に刺激が呈示されたと思った場所を手許のボタンを用いて答える．応答は 4AFC(four-alternative forced-choice) の方法を用いて，テスト刺激がディスプレイ上の 4 箇所の内どこに呈示されたかを答えてもらった．4AFC では，テスト刺激が呈示された場所が分からなかった場合でも 4 箇所の内何れかを必ず答えてもらう．手順 3 から手順 7 はテストを行う 8 つの色方向に関して色弁別閾値が決定するまで繰り返す．

弁別閾値の決定には，two down-one up の階段法を用いた．これは，被験者の応答が 2 回続けて正しい場合はテスト刺激のステップを下げ，間違っている場合はテスト刺激のステップを上げるといようにして，ステップの上下の変化点を求める方法である．今回は，6 回の変化点のうち 3～6 回目の平均値により決定した．テスト刺激の 1 ステップは $u'v'$ 色度図上で 0.01 の距離を取った．

第 3 章

実験結果

色弁別閾値は 3 回の実験の平均値をとって、図 3.1(左) のように $u'v'$ 色度図上にプロットした。更にそれを錐体出力軸上 ($S, L - 2M$) 再プロットすると、図 3.1(右) のようになった。この錐体出力軸上にプロットした図を結果を説明する図として用いた。このプロット方法では、先ほどの $u'v'$ 色度図での D 軸, T 軸はそれぞれ $L - 2M$ 軸, S 軸にあたり、錐体出力軸上では S 軸のプラス方向が青方向, マイナス方向が黄方向, D 軸のプラス方向が赤方向, マイナス方向が緑方向になる。各結果には、順応をしないときの色弁別閾値を比較のために一緒にプロットした。また、各点は図 3.1(右) に示すように平行四辺形で近似し、その平行四辺形を色弁別閾値とした。

閾値の近似をする場合、楕円を用いられることが多いが、今回の実験ではデータ点を 8 点で取っているので楕円で近似するには不十分であると考え、より、正確に近似することのできる平行四辺形を用いた。平行四辺形での近似は、順応刺激 1, 3, 4 については辺の傾きが同じになるようにし、順応刺激 2 については異なった傾きで近似した。これは、順応刺激 1, 3, 4 は錐体レベルでの刺激量が同じであるが、順応刺激 2 は他の 3 つとは異なると考えられるからである。

3.1 各実験における結果

各実験結果の図には色弁別閾値の比較のために順応を行わない場合の閾値を同時にプロットした。以下では、順応を行わなかった場合と比較して、近似した平行四辺形の 4 つの辺と、原点との距離がどの程度上昇しているかを見ていく。このとき、順応後の閾値が順応を行わ

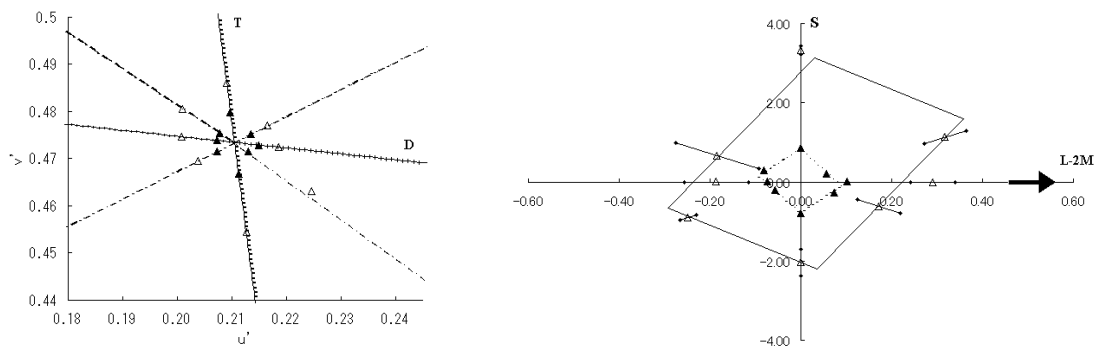


図 3.1 矩形波順応刺激-サイン波テスト刺激のときの色弁別閾値， $u'v'$ 色度図でのプロット (左) と錐体出力軸でのプロット (右)，左の図は横軸に u' ，縦軸に v' をとっている．右の図は横軸に L-2M，縦軸に S をとっている． \triangle ：順応無しときの色弁別閾値， \blacktriangle ：色順応後の色弁別閾値 (赤順応色)，矢印は順応方向 (赤) を示す．

なかった場合の閾値よりも外側に広がっているときに閾値が上昇したということになる．

3.1.1 実験 1：順応刺激 1(矩形波順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺)

図 3.2～図 3.5 は，実験 1 において順応色を赤，緑としたときの被験者 YF と MH の色弁別閾値である．

被験者 YF と MH の両方とも順応色が赤のとき全体的に閾値が上昇しているが，第 1 象限の方向への閾値上昇がやや他の方向よりも閾値上昇が多かった．被験者 YF の場合は，順応色が緑のときも赤のときと同様の傾向を示しているが，こちらは第 2 象限の方向への閾値上昇が他の方向よりも大きかった．被験者 MH の場合は第 4 象限の方向への閾値上昇が他の方向よりも大きかった．

3.1 各実験における結果

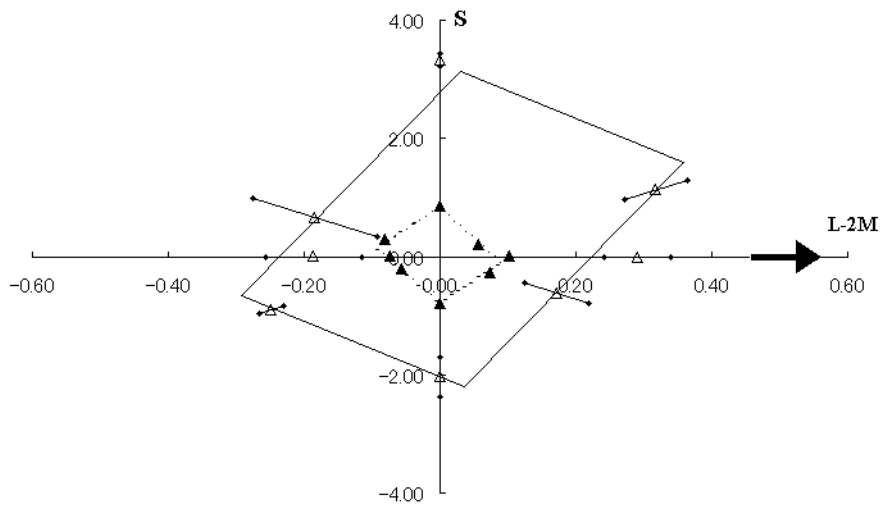


図 3.2 被験者 YF の実験 1 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

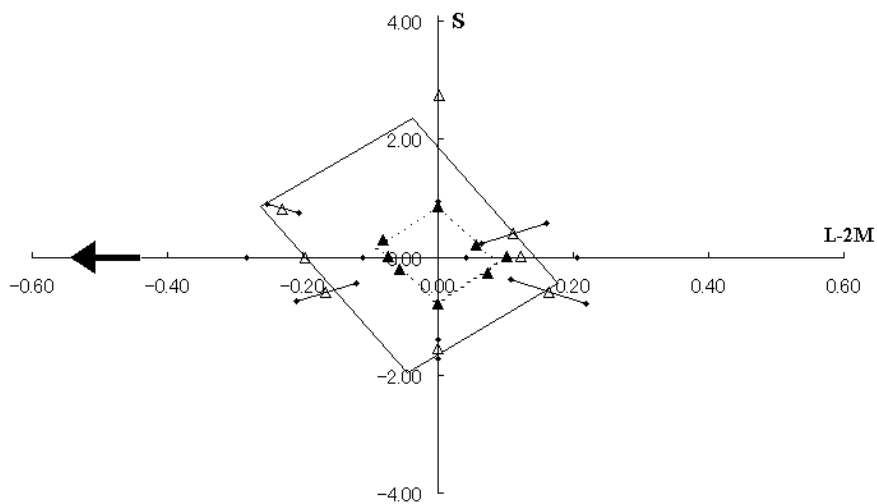


図 3.3 被験者 YF の実験 1 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

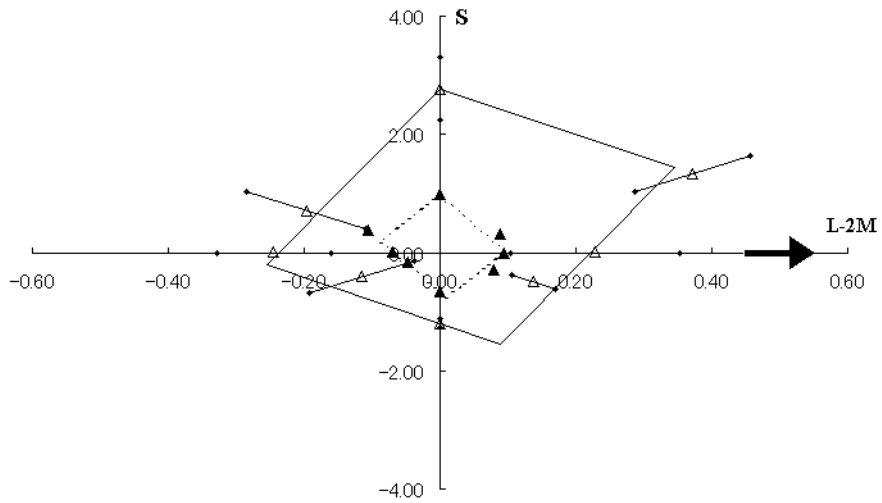


図 3.4 被験者 MH の実験 1 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. Δ : 順応無し時の色弁別閾値, \bullet : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

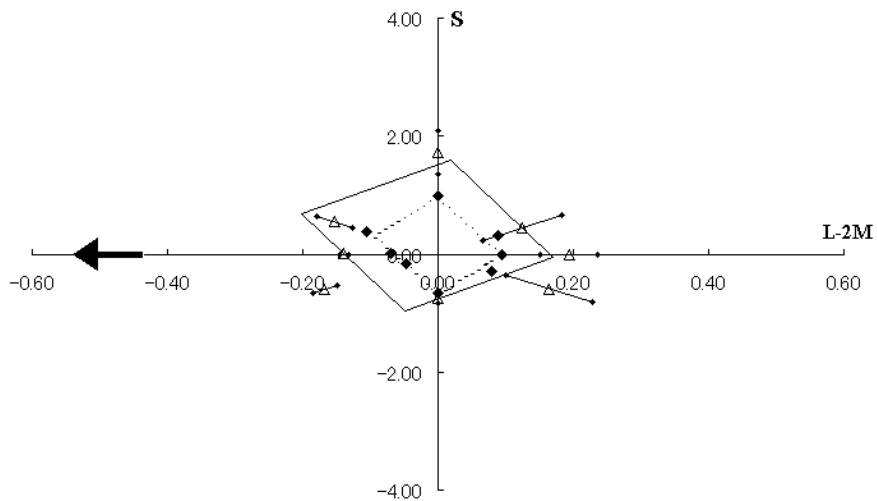


図 3.5 被験者 MH の実験 1 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. Δ : 順応無し時の色弁別閾値, \bullet : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1 各実験における結果

3.1.2 実験 2：順応刺激 2(定常光順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺)

図 3.6～図 3.9 は実験 2 において順応色を赤，緑としたときの被験者 YF と MH の色弁別閾値である。

順応色が赤の場合，被験者 YF の閾値は第 1，3 象限の方向に特に大きく上昇した．被験者 MH の場合は第 1 象限の方向への閾値上昇は大きいですが，第 3 象限の方向への閾値上昇は小さかった．順応色が緑の場合，被験者 YF の閾値は順応色が赤のときほど上昇しておらず，第 2 象限の方向への閾値上昇が他の方向への閾値上昇よりも少し大きい程度であった．

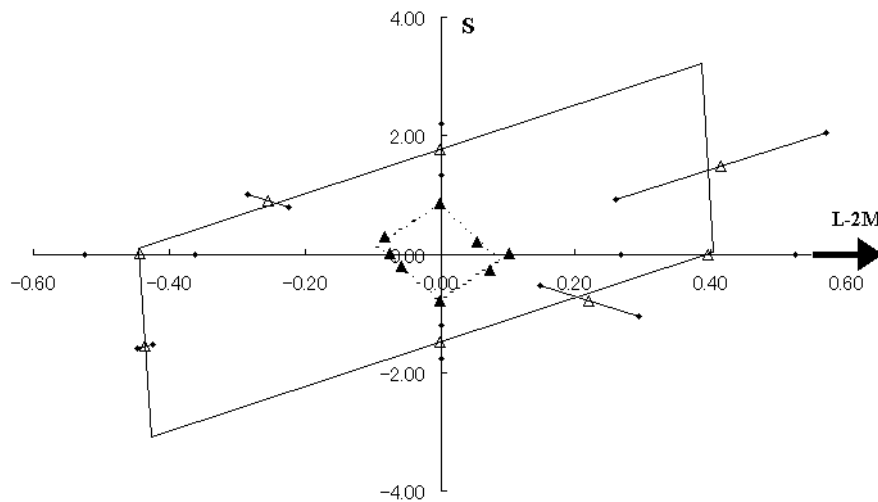


図 3.6 被験者 YF の実験 2 での色弁別閾値 (順応色赤)，横軸に L-2M，縦軸に S をとっている．
○：順応無し時の色弁別閾値，
△：色順応後の色弁別閾値，
矢印は順応方向 (赤) を示す．

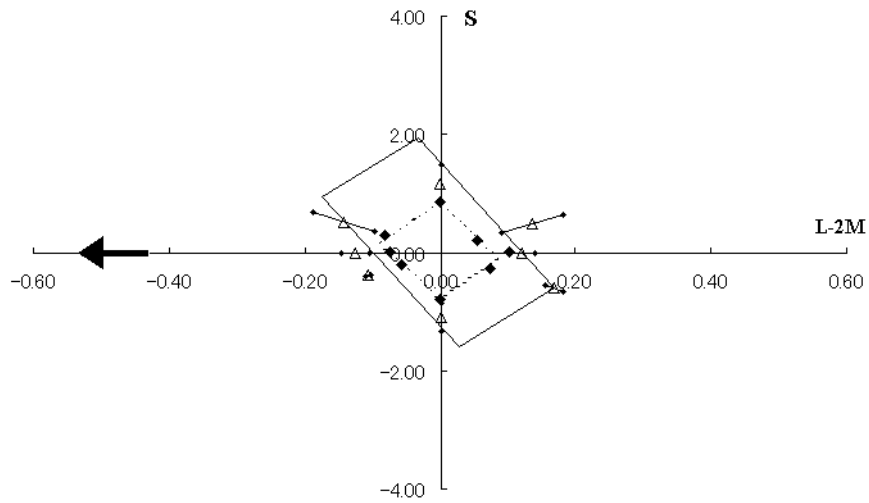


図 3.7 被験者 YF の実験 2 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \bullet : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

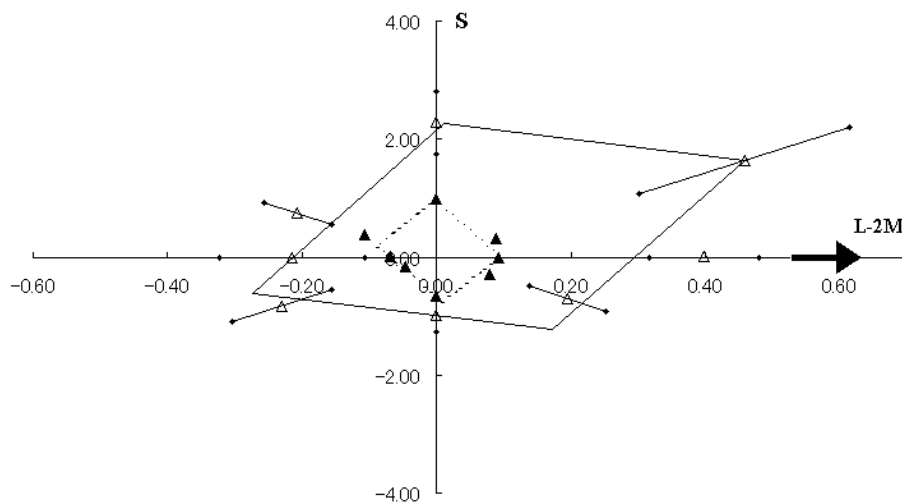


図 3.8 被験者 MH の実験 2 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \bullet : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

3.1 各実験における結果

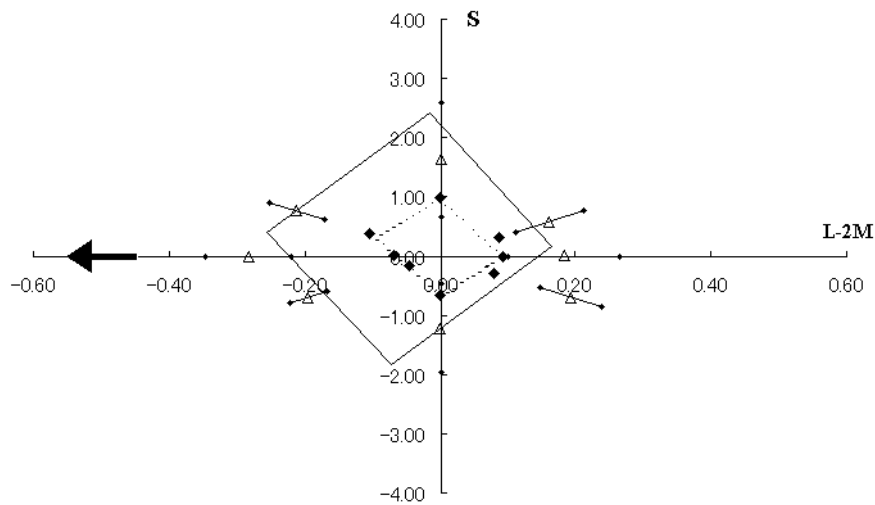


図 3.9 被験者 MH の実験 2 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacklozenge : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1.3 実験 3: 順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 1(サイン波テスト刺)

図 3.10 ~ 図 3.13 は実験 3 において順応色を赤, 緑としたときの被験者 YF と MH の色弁別閾値である.

順応色が赤の場合, 被験者 YF の閾値は第 1 象限と第 3 象限の方向の閾値上昇が同程度であり, 第 2, 4 象限の方向への閾値上昇よりもやや大きかった. 被験者 MH は実験 2 の結果と同様で第 1 象限の方向への閾値上昇は大きい, 第 3 象限の方向への閾値上昇は小さかった. 順応色が緑の場合, 被験者 YF の閾値はどの方向にも同様に閾値が上昇した. 被験者 MH の場合もほぼ同様の結果であったが, MH の場合は第 1, 第 3 象限への閾値上昇がやや大きかった.

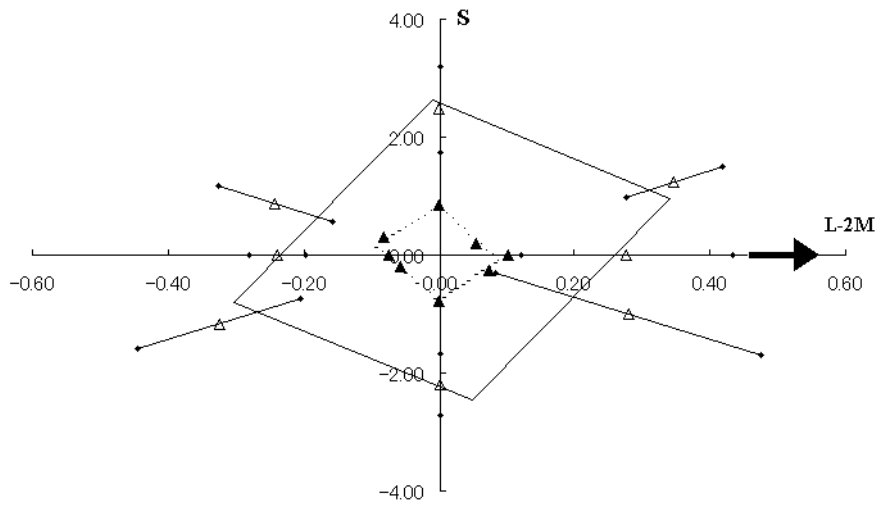


図 3.10 被験者 YF の実験 3 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

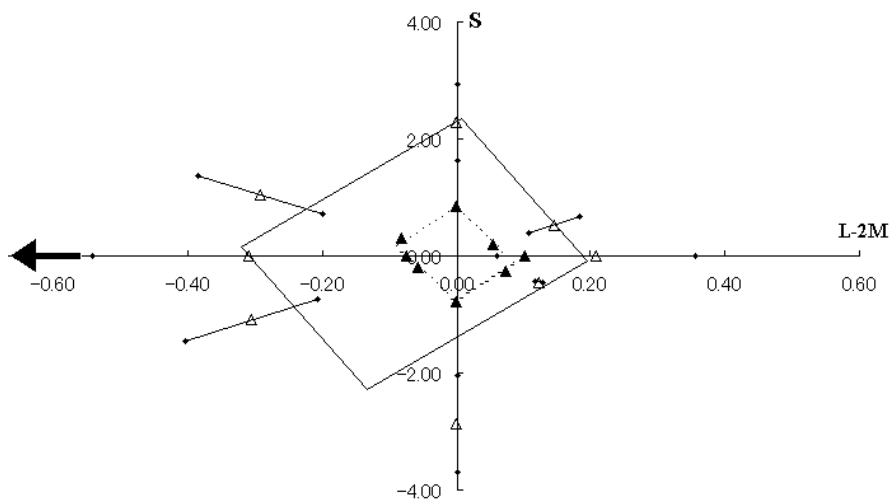


図 3.11 被験者 YF の実験 3 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1 各実験における結果

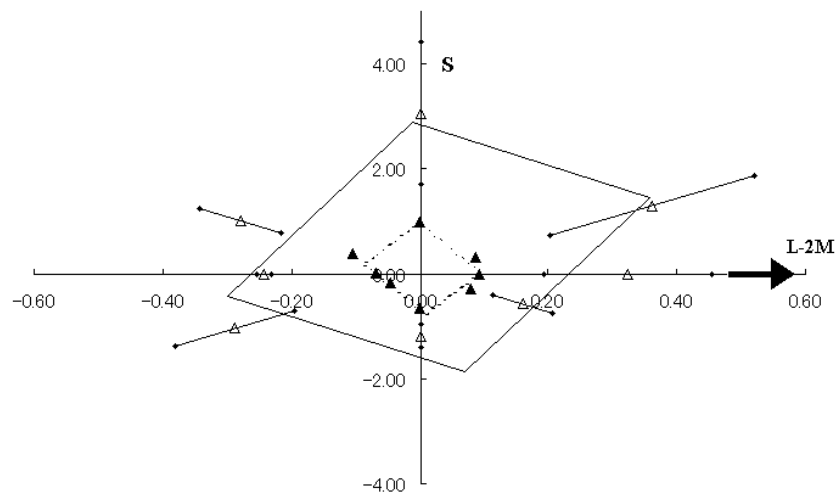


図 3.12 被験者 MH の実験 3 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

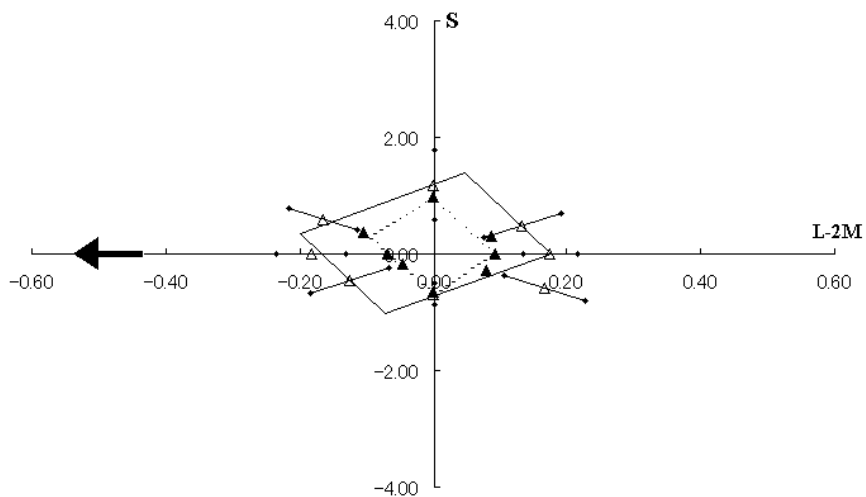


図 3.13 被験者 MH の実験 3 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1.4 実験4：順応刺激4(OFF 鋸波状順応刺激)-テスト刺激1(サイン波テスト刺)

図 3.14～図 3.17 は実験 4 において順応色を赤，緑としたときの被験者 YF と MH の色弁別閾値である。

順応色が赤の場合，被験者 YF の閾値上昇はどの方向も同じくらいであったが，被験者 MH の第 1 象限での閾値上昇は他の方向の閾値上昇よりもやや大きかった．順応色が緑の場合，YF と MH どちらの被検者も全体的に同じくらいの閾値上昇が見られた。

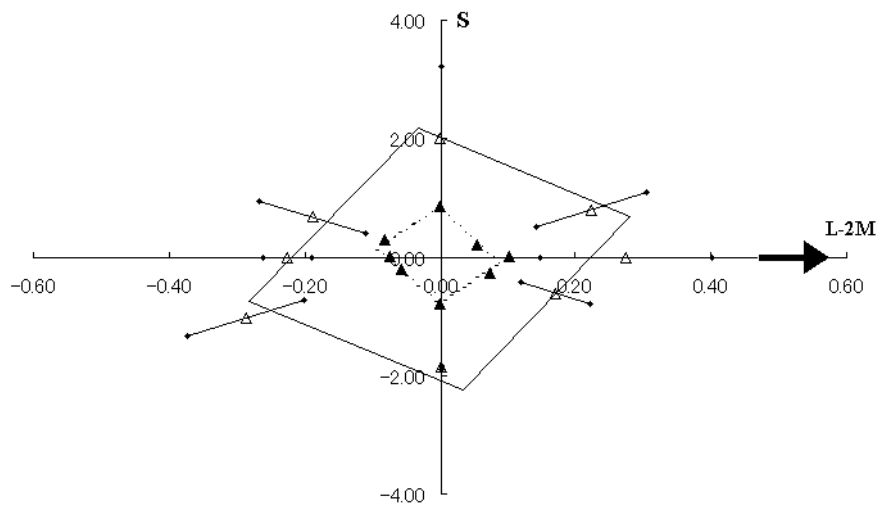


図 3.14 被験者 YF の実験 4 での色弁別閾値 (順応色赤)，横軸に L-2M，縦軸に S をとっている。△：順応無し時の色弁別閾値，○：色順応後の色弁別閾値，矢印は順応方向 (赤) を示す。

3.1 各実験における結果

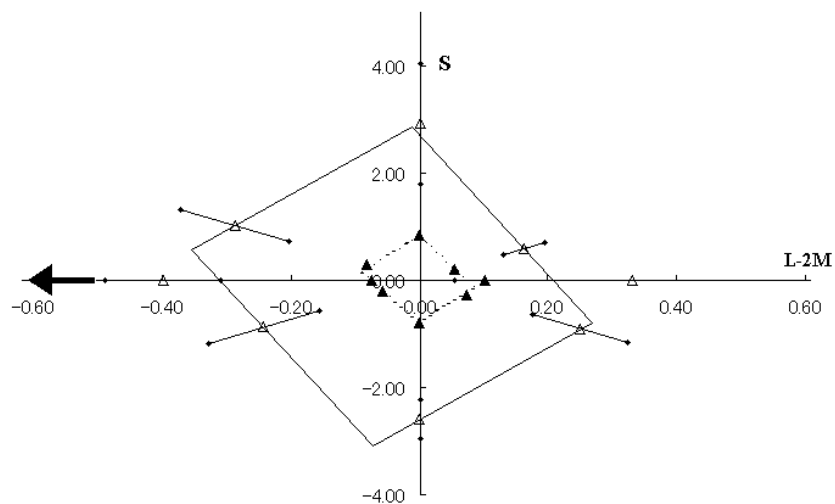


図 3.15 被験者 YF の実験 4 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無しの際の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

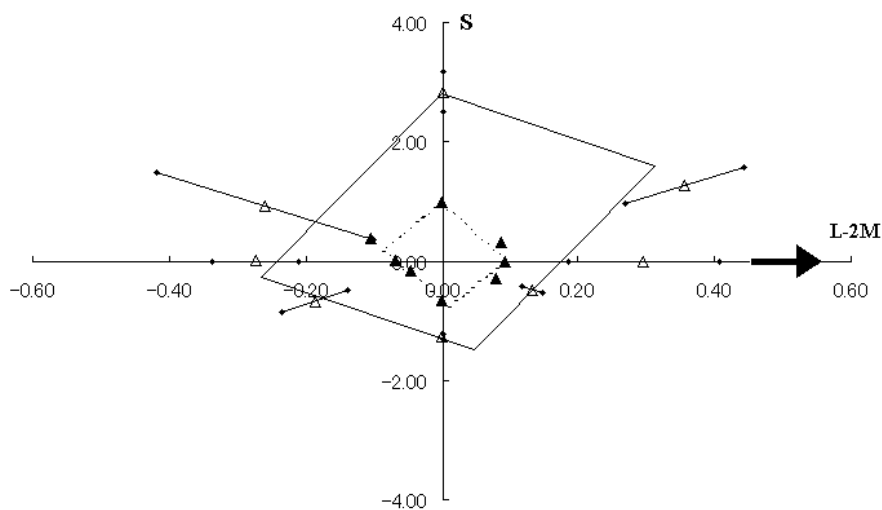


図 3.16 被験者 MH の実験 4 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無しの際の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

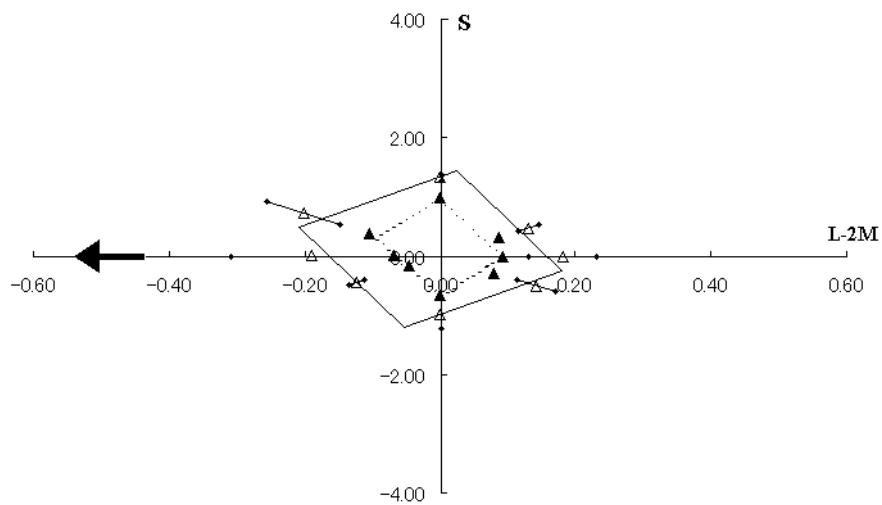


図 3.17 被験者 MH の実験 4 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1.5 実験 5: 順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 2(ON 鋸波状テスト刺)

図 3.18 ~ 図 3.25 は実験 5 において順応色を赤, 緑としたときの被験者 YF, MH, SI と RO の色弁別閾値である.

順応色が赤の場合, どの被検者の閾値も第 1 象限が他の方向よりも閾値の上昇が大きくなる傾向を示した. そのなかでも特に被験者 SI は第 1 象限の方向への閾値上昇が大きく第 3 象限への閾値上昇が小さい傾向を示した. 順応色が緑の場合, 被験者 YF と MH の閾値は第 3 象限が他の方向よりも閾値の上昇が大きくなる傾向を示した. 被験者 SI と RO も同じ閾値上昇の傾向は見られたが YF と MH よりはその傾向が弱かった.

3.1 各実験における結果

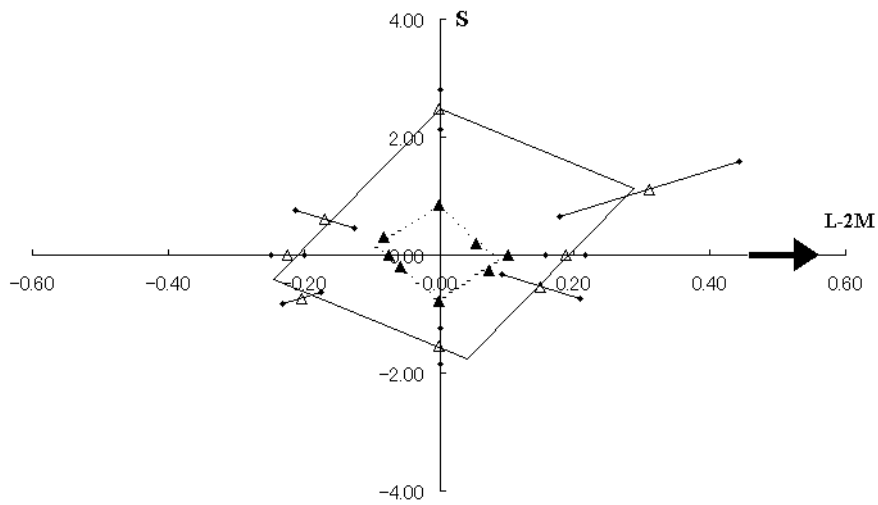


図 3.18 被験者 YF の実験 5 での n 色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

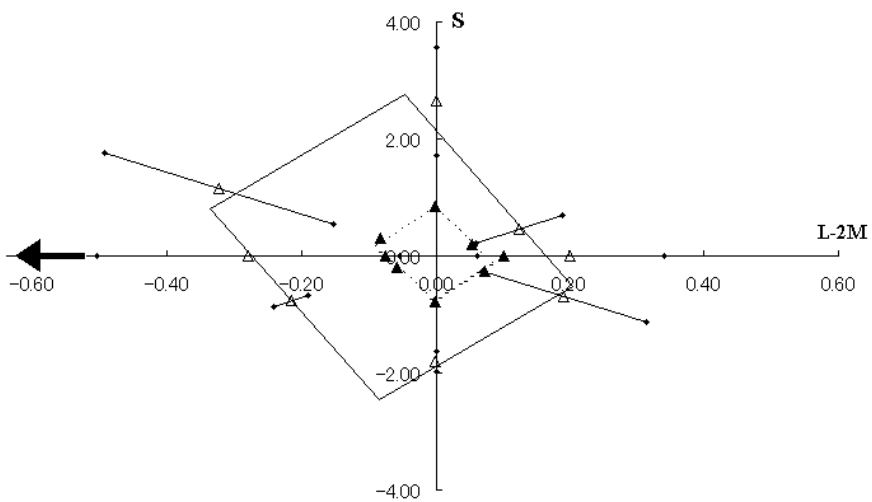


図 3.19 被験者 YF の実験 5 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

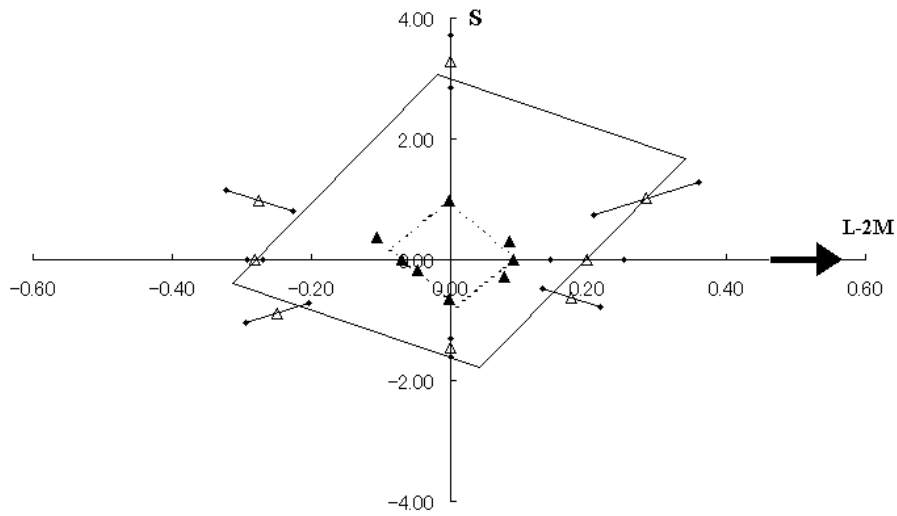


図 3.20 被験者 MH の実験 5 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

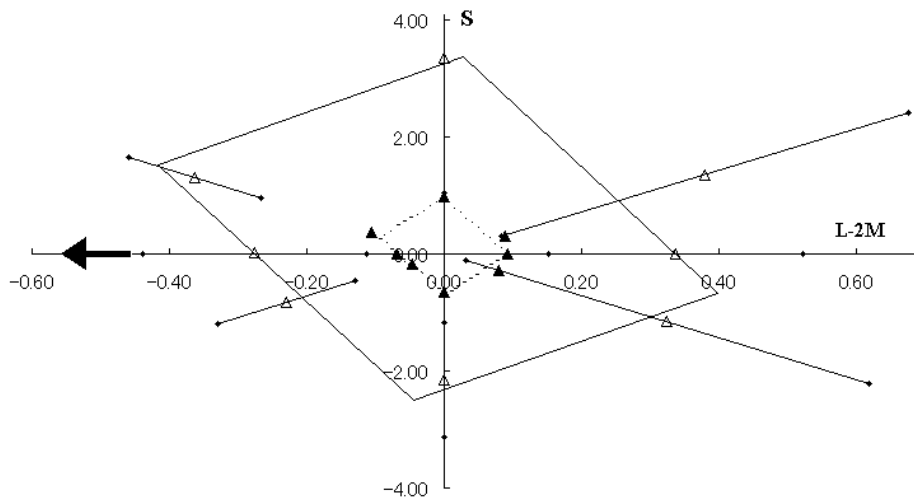


図 3.21 被験者 MH の実験 5 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1 各実験における結果

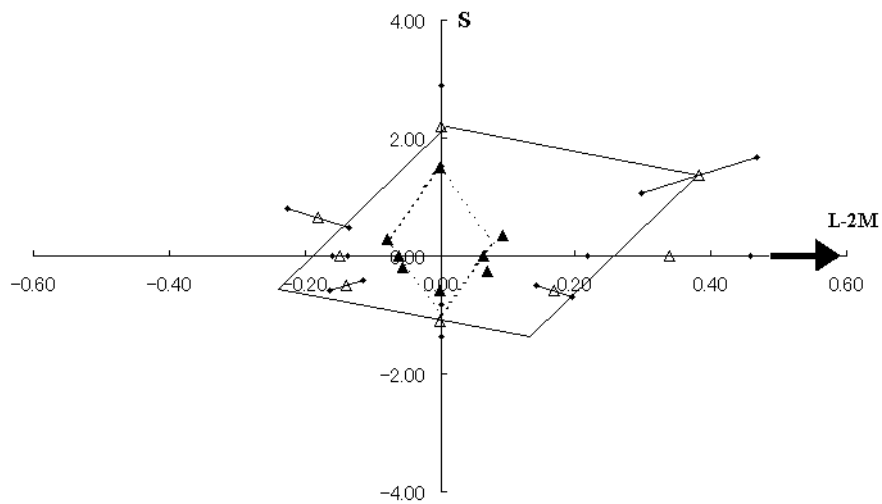


図 3.22 被験者 SI の実験 5 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

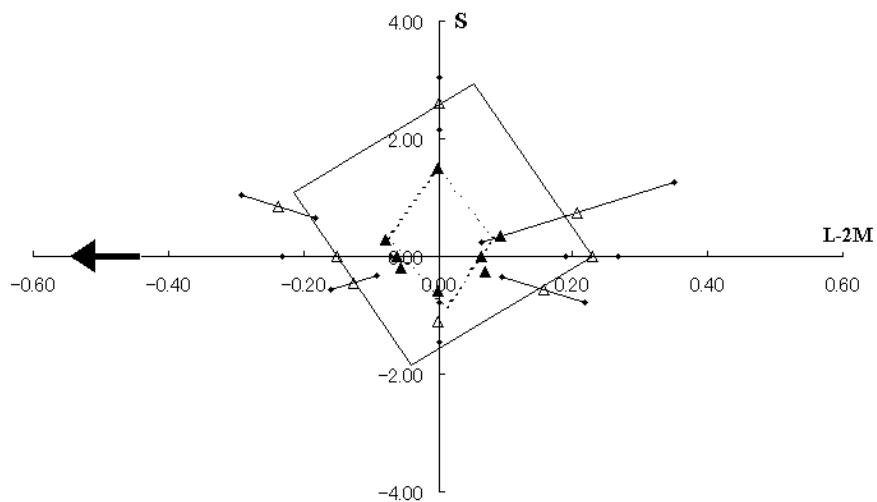


図 3.23 被験者 SI の実験 5 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

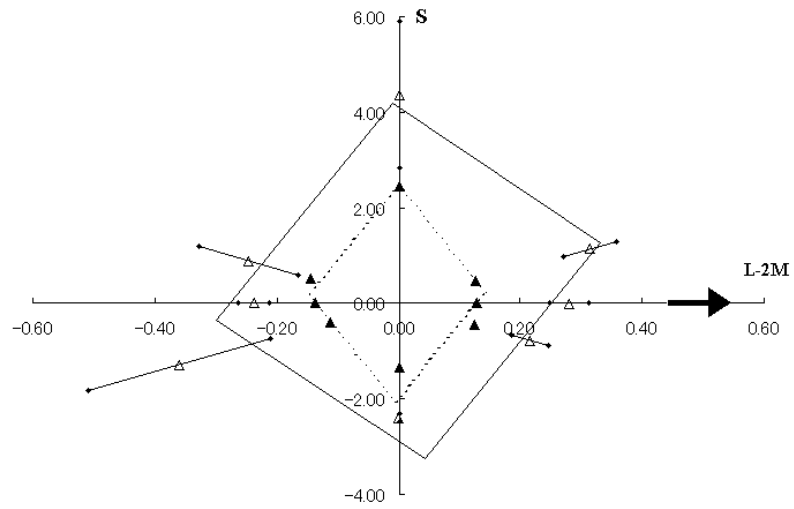


図 3.24 被験者 RO の実験 5 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

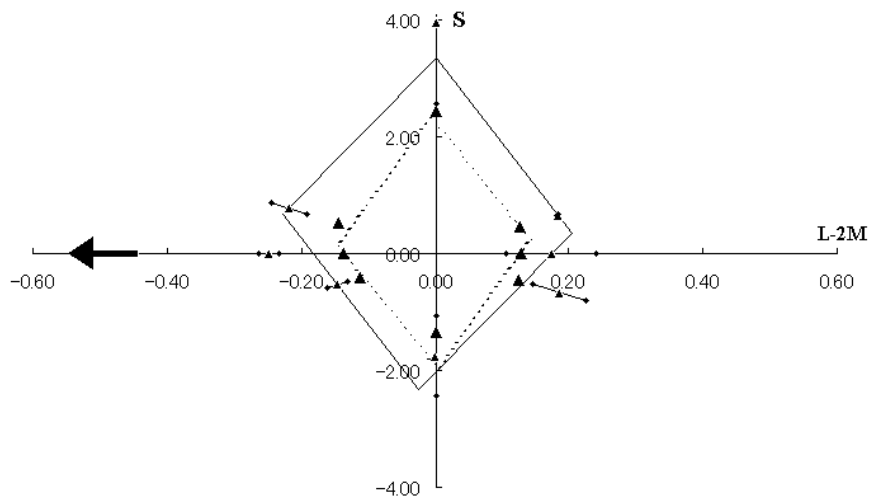


図 3.25 被験者 RO の実験 5 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1 各実験における結果

3.1.6 実験 6：順応刺激 4(OFF 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 2(ON 鋸波状テスト刺)

図 3.26～図 3.33 は実験 6 において順応色を赤，緑としたときの被験者 YF，MH，SI と RO の色弁別閾値である。

順応色が赤の場合，被験者 YF 以外はやや第 1 象限の方向の閾値上昇が他の方向よりも大きかった．被験者 YF の場合はどの方向にたいしてもほぼ同じくらいであった．順応色が緑の場合，被験者 YF，MH と RO はどの方向にたいしてもほぼ同じくらいであったが，被験者 SI に第 2 象限の方向の閾値上昇が他の方向よりも大きかった．

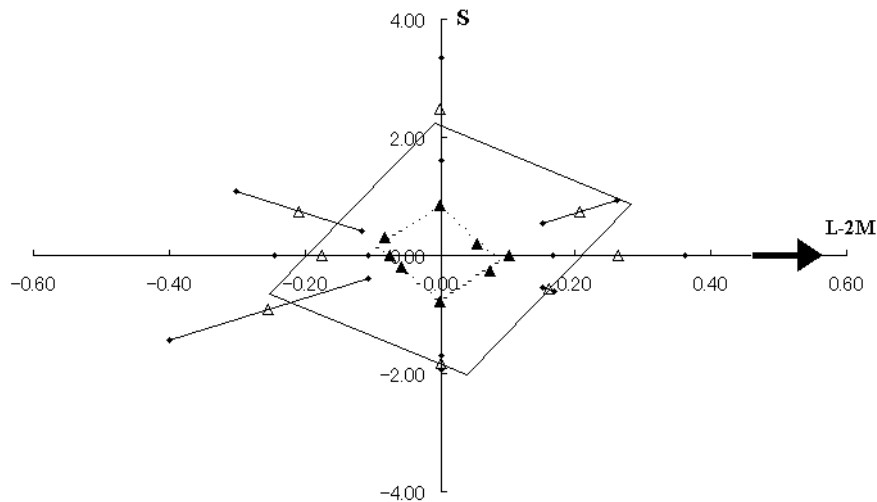


図 3.26 被験者 YF の実験 6 での色弁別閾値 (順応色赤)，横軸に L-2M，縦軸に S をとっている． \triangle ：順応無しの際の色弁別閾値， \blacktriangle ：色順応後の色弁別閾値，矢印は順応方向 (赤) を示す．

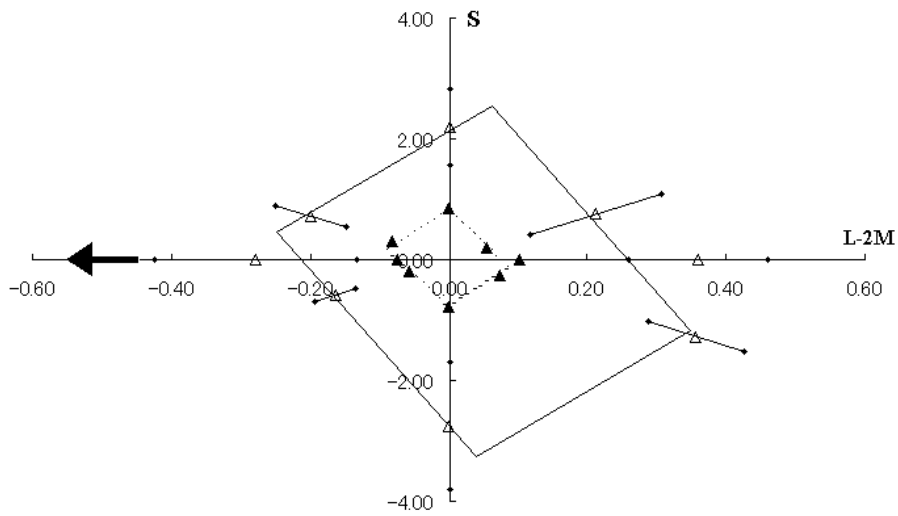


図 3.27 被験者 YF の実験 6 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

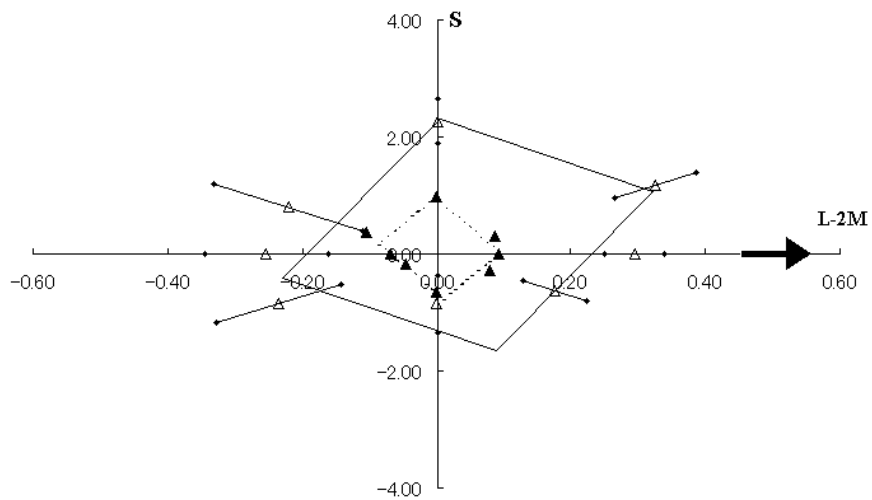


図 3.28 被験者 MH の実験 6 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

3.1 各実験における結果

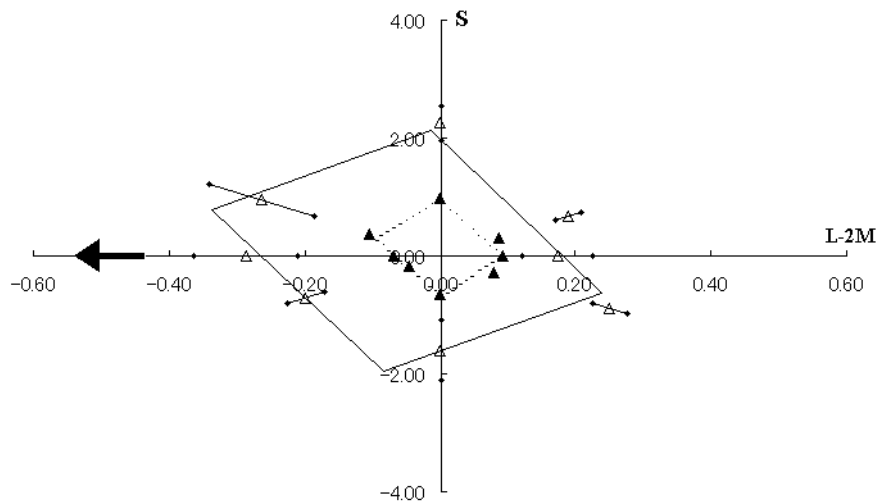


図 3.29 被験者 MH の実験 6 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

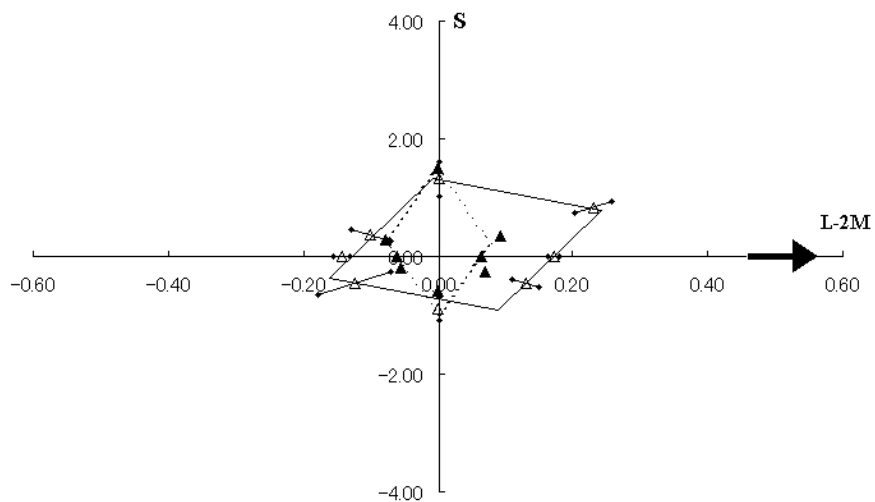


図 3.30 被験者 SI の実験 6 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

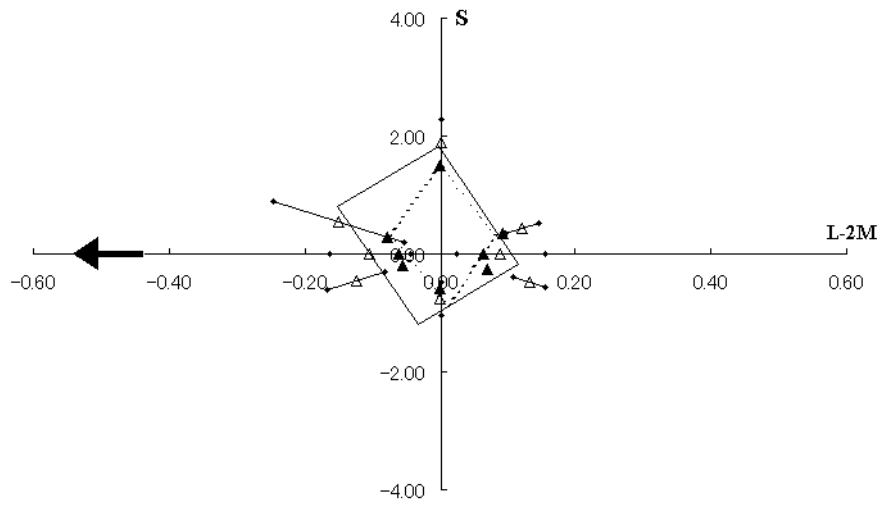


図 3.31 被験者 SI の実験 6 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

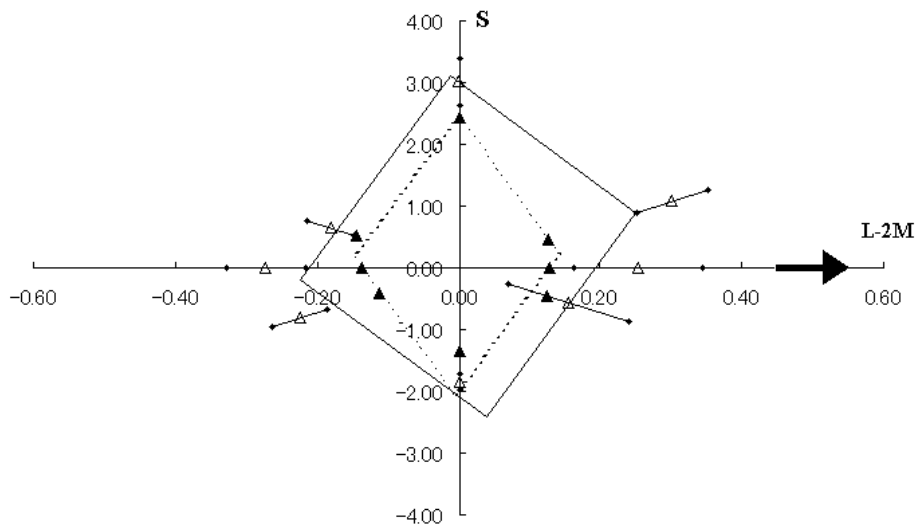


図 3.32 被験者 RO の実験 6 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

3.1 各実験における結果

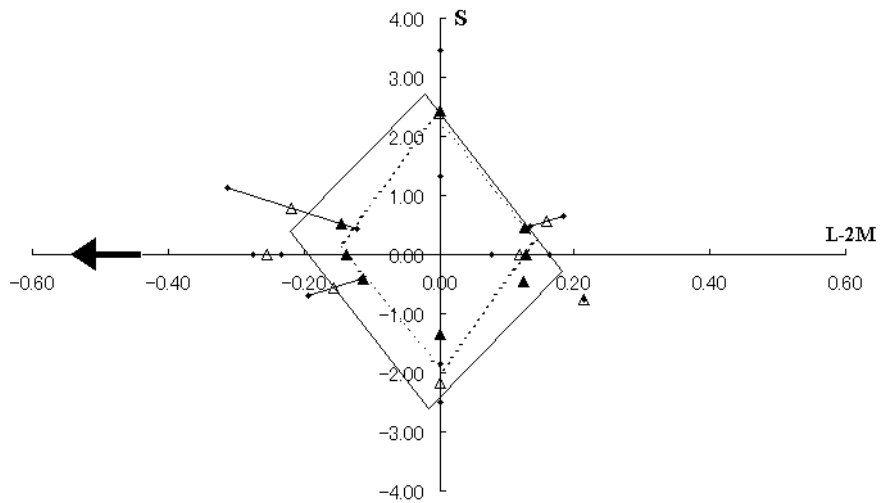


図 3.33 被験者 RO の実験 6 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1.7 実験 7: 順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 3(OFF 鋸波状テスト刺)

図 3.34 ~ 図 3.41 は実験 7 において順応色を赤, 緑としたときの被験者 YF, MH, SI と RO の色弁別閾値である.

順応色が赤の場合, どの被験者の閾値も第 1 象限が他の方向よりも閾値の上昇が大きくなった. 特に被験者 SI に関してはその傾向が強く現れていた. 順応色が緑の場合, どの被験者の閾値も第 2 象限が他の方向よりも閾値の上昇が大きくなった. 被験者 YF に関しては第 2, 第 3 象限方向への閾値の上昇, つまり緑方向への閾値の上昇が赤方向への閾値の上昇よりも大きくなった.

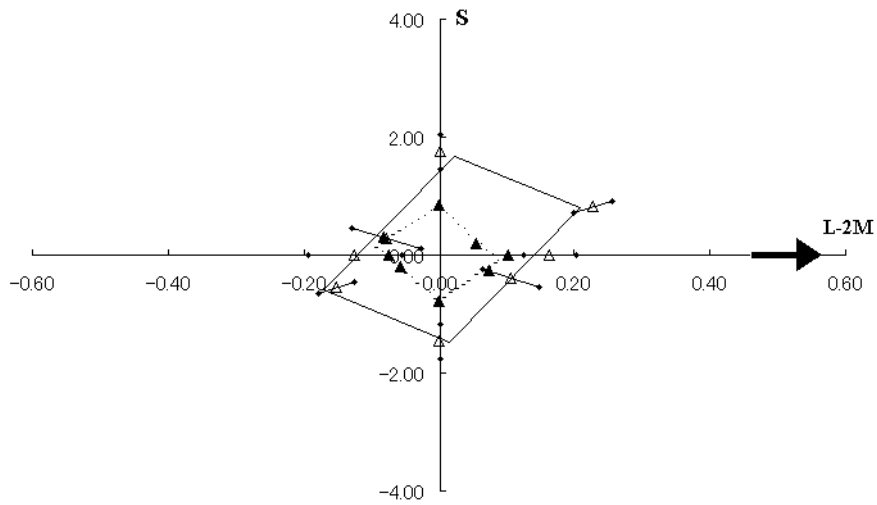


図 3.34 被験者 YF の実験 7 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

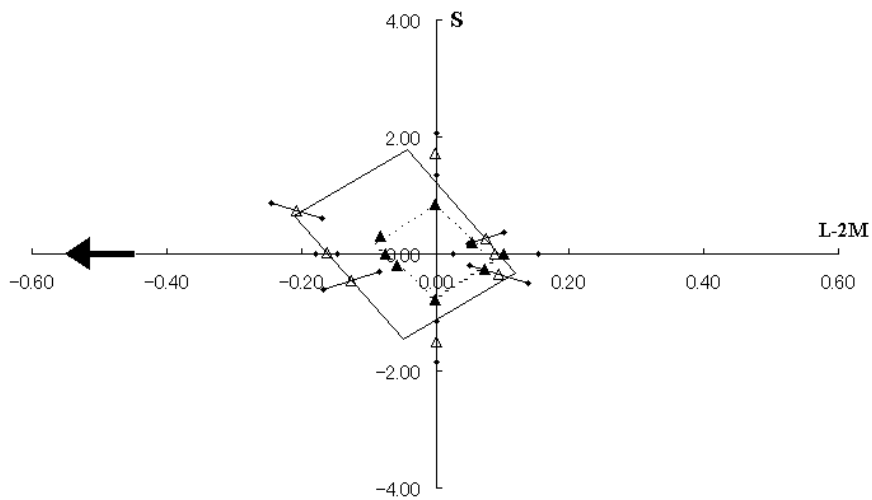


図 3.35 被験者 YF の実験 7 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1 各実験における結果

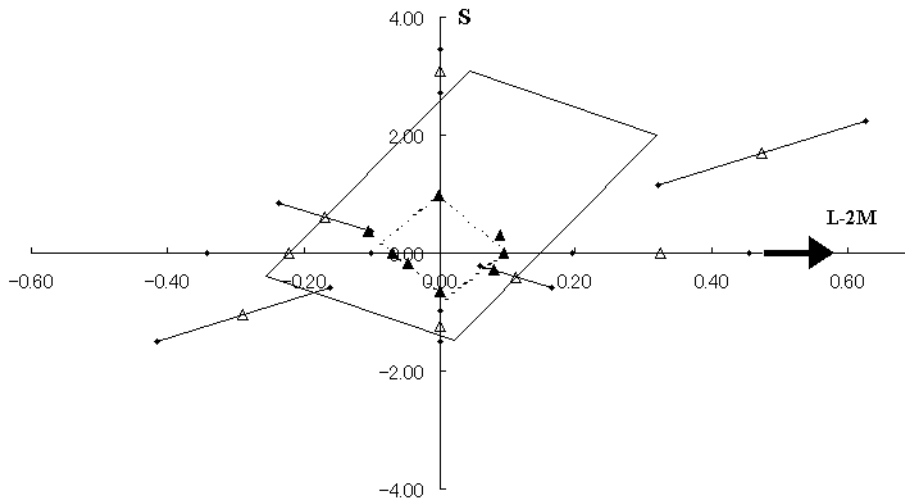


図 3.36 被験者 MH の実験 7 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

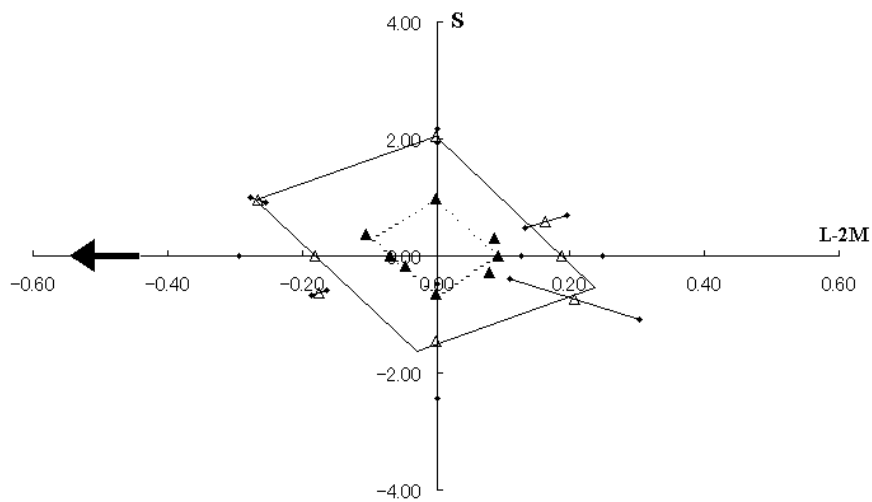


図 3.37 被験者 MH の実験 7 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

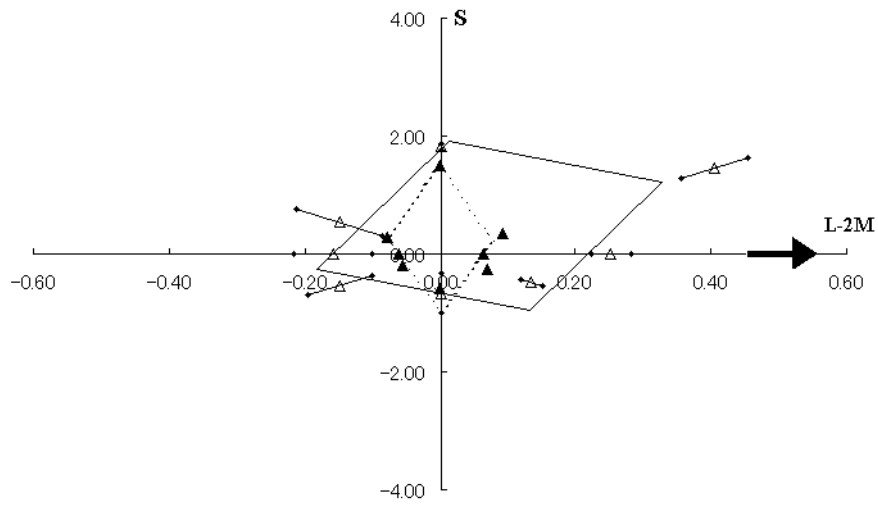


図 3.38 被験者 SI の実験 7 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

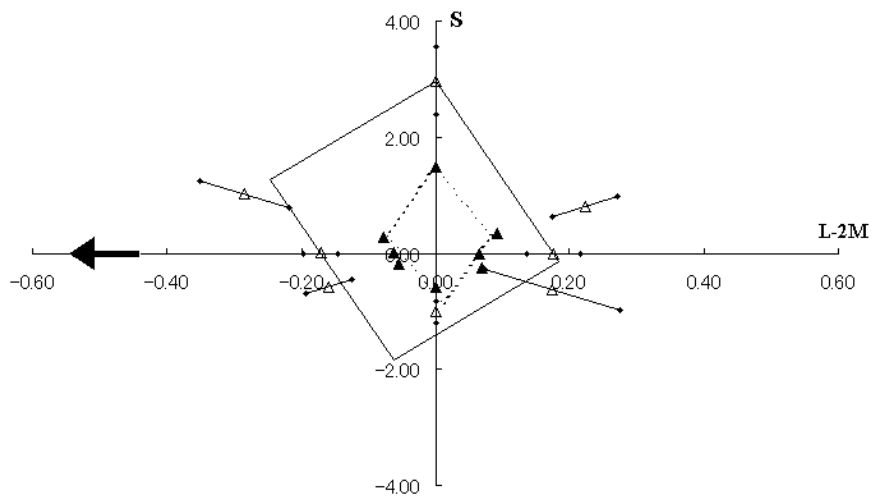


図 3.39 被験者 SI の実験 7 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1 各実験における結果

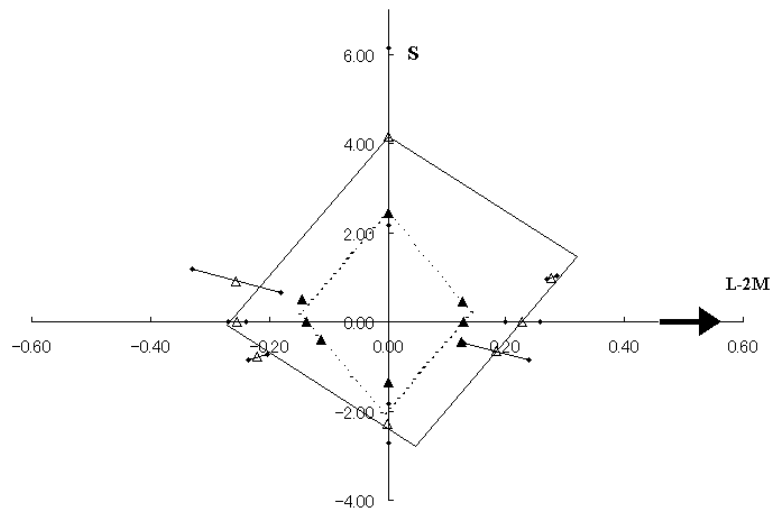


図 3.40 被験者 RO の実験 7 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無しの際の色弁別閾値, \triangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

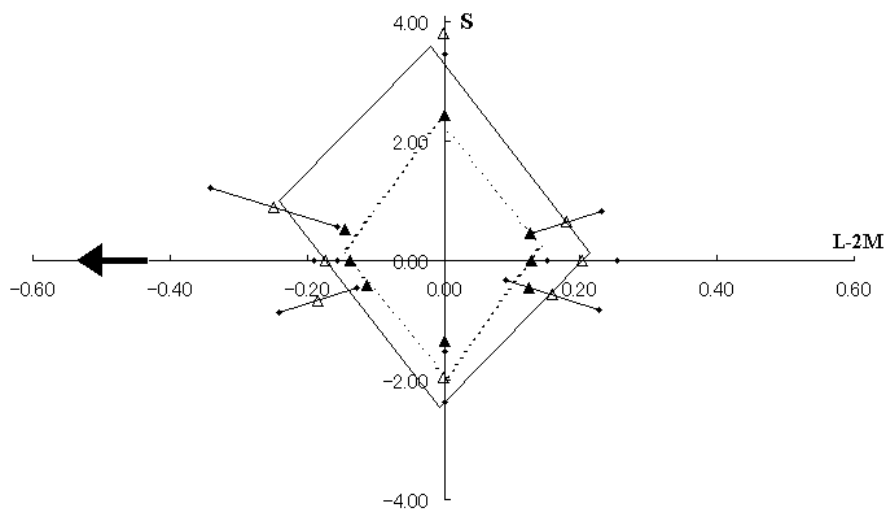


図 3.41 被験者 RO の実験 7 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無しの際の色弁別閾値, \triangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.1.8 実験 8：順応刺激 4(OFF 鋸波状順応刺激)-テスト刺激 3(OFF 鋸波状テスト刺)

図 3.42～図 3.49 は実験 8 において順応色を赤，緑としたときの被験者 YF，MH，SI と RO の色弁別閾値である．

順応色が赤の場合，被験者 YF はどの方向にたいしてもほぼ同じくらいの閾値上昇が見られたが，他の被験者に関しては，赤方向への閾値上昇が緑方向への閾値上昇よりも大きくなった．順応色が緑の場合，被験者 YF と RO は方向にたいしてもほぼ同じくらいの閾値上昇が見られたが，被験者 MH と SI に関しては，緑方向への閾値上昇が緑方向への閾値上昇よりも大きくなった．

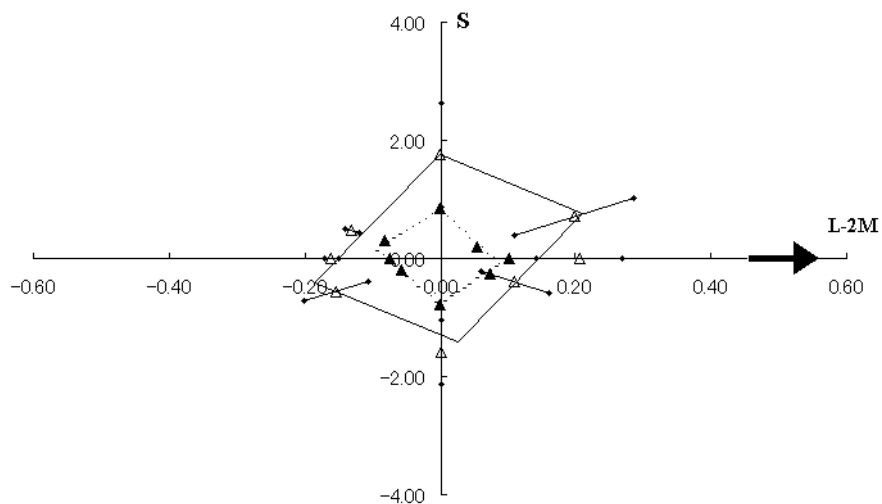


図 3.42 被験者 YF の実験 8 での色弁別閾値 (順応色赤)，横軸に L-2M，縦軸に S をとっている．
 ○：順応無しの際の色弁別閾値，
 ●：色順応後の色弁別閾値，矢印は順応方向 (赤) を示す．

3.1 各実験における結果

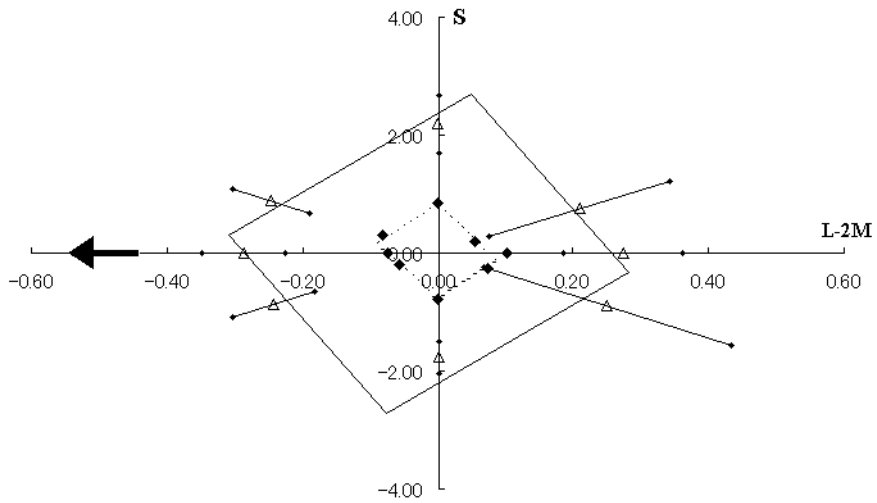


図 3.43 被験者 YF の実験 8 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \diamond : 順応無し時の色弁別閾値, \triangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

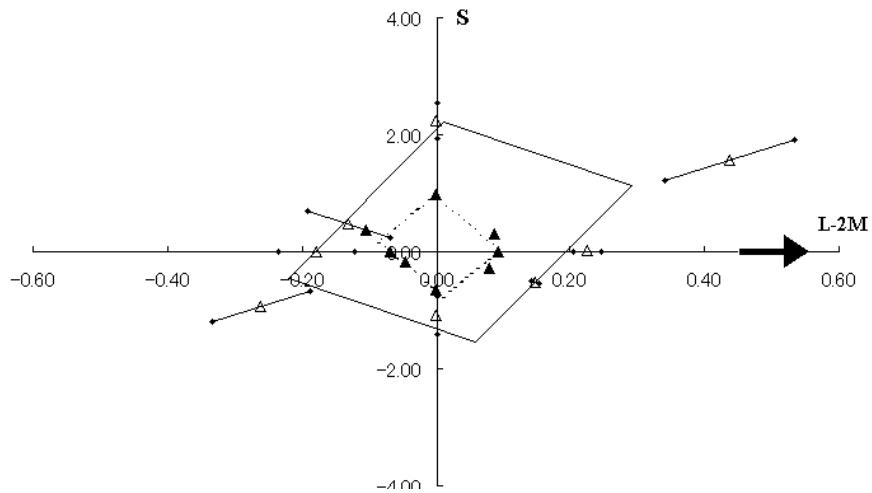


図 3.44 被験者 MH の実験 8 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \diamond : 順応無し時の色弁別閾値, \triangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

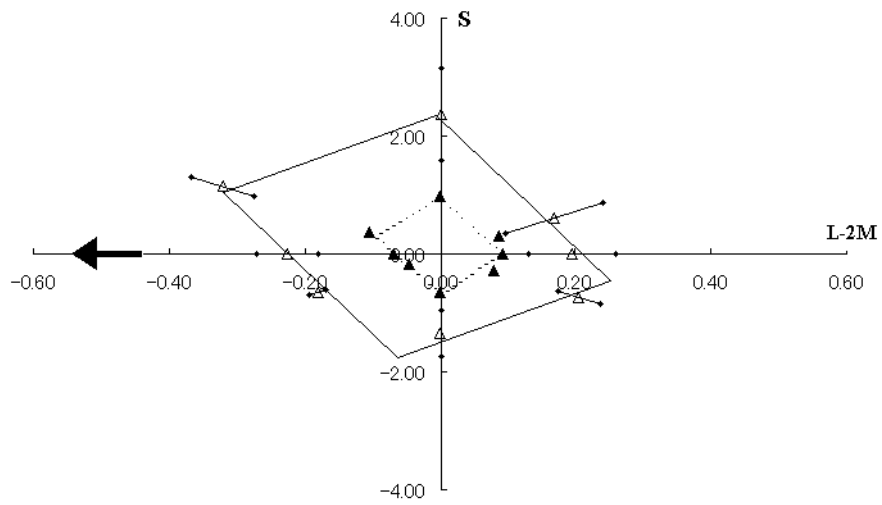


図 3.45 被験者 MH の実験 8 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

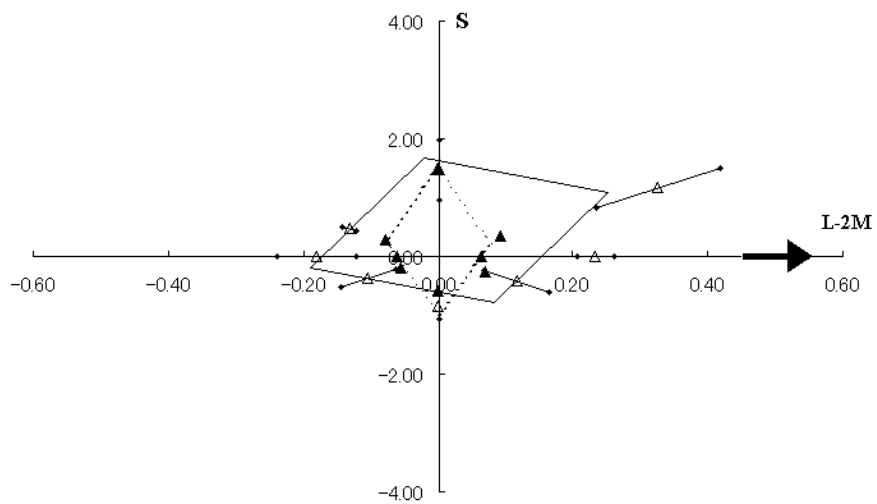


図 3.46 被験者 SI の実験 8 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

3.1 各実験における結果

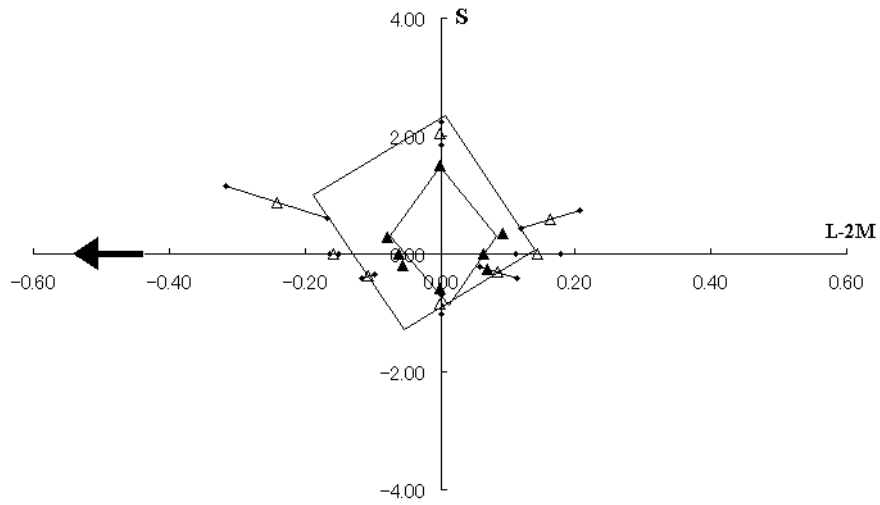


図 3.47 被験者 SI の実験 8 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. : 順応無し時の色弁別閾値, : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

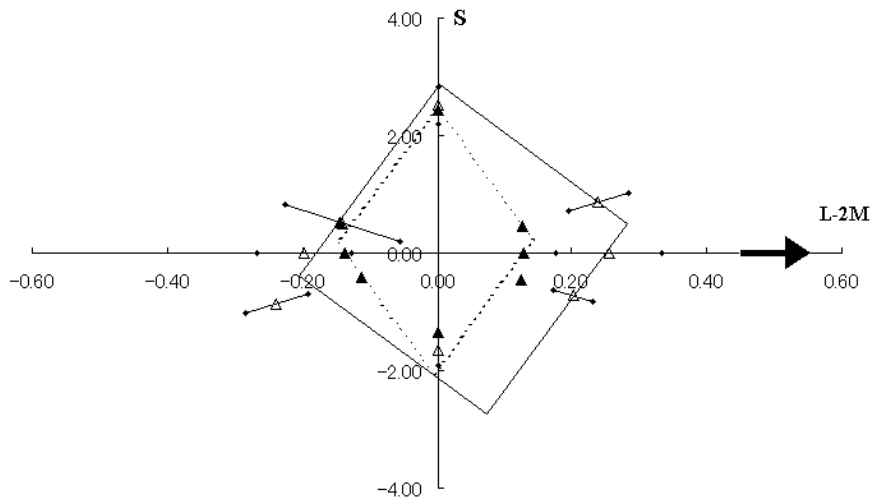


図 3.48 被験者 RO の実験 8 での色弁別閾値 (順応色赤), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. : 順応無し時の色弁別閾値, : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (赤) を示す.

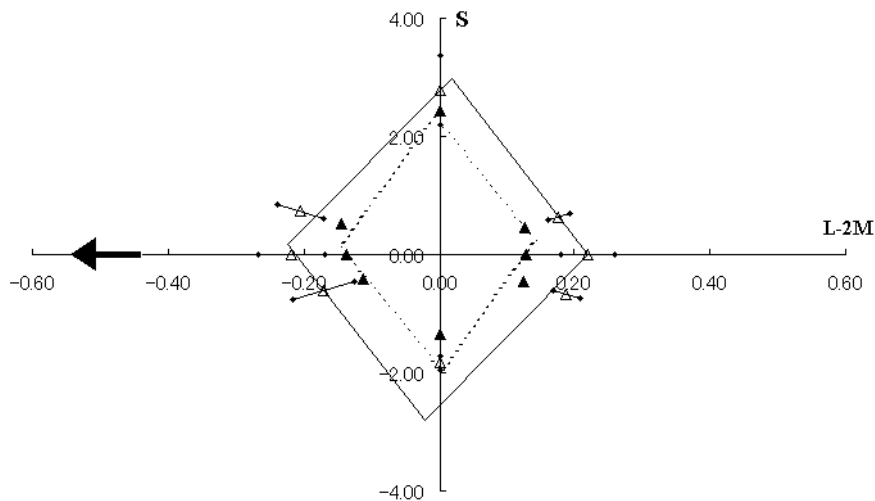


図 3.49 被験者 RO の実験 8 での色弁別閾値 (順応色緑), 横軸に L-2M, 縦軸に S をとっている. \triangle : 順応無し時の色弁別閾値, \blacktriangle : 色順応後の色弁別閾値, 矢印は順応方向 (緑) を示す.

3.2 赤方向と緑方向の色弁別閾値の比較

順応色が赤のときの結果では, 第 1 象限への閾値上昇が他の方向の閾値上昇よりも大きくなる傾向を示すことが多かった. そこで図 3.50 の細い矢印で示すように, W から第 1 象限の辺との距離を順応色が赤のときの赤方向での閾値上昇, 第 3 象限の辺との距離を緑方向での閾値上昇として比較を行った. また, 順応色が緑のときは, 第 2 象限の方向を緑方向, 第 4 象限の方向を赤方向の閾値として比較を行った.

以上のような方法で閾値上昇を比較したものが図 3.51 ~ 図 3.58 である. 図の縦軸の正の方向が赤方向の閾値, 負の方向が緑方向の閾値を示している. 各データは実験 1 ~ 8 の順番にならべられており, データの下の文字は実験 1 ~ 8 の順応刺激 (上)-テスト刺激 (下) を表している. 順応刺激の 'Square' は順応刺激 1 の矩形波順応刺激, 'Constant' は順応刺激 2 の定常光順応刺激, 'ON' は順応刺激 3 の ON 鋸波状順応刺激, 'OFF' は順応刺激 4 の OFF 鋸波状順応刺激のことで, テスト刺激の 'Sin' はテスト刺激 1 のサイン波テスト刺激, 'ON'

3.2 赤方向と緑方向の色弁別閾値の比較

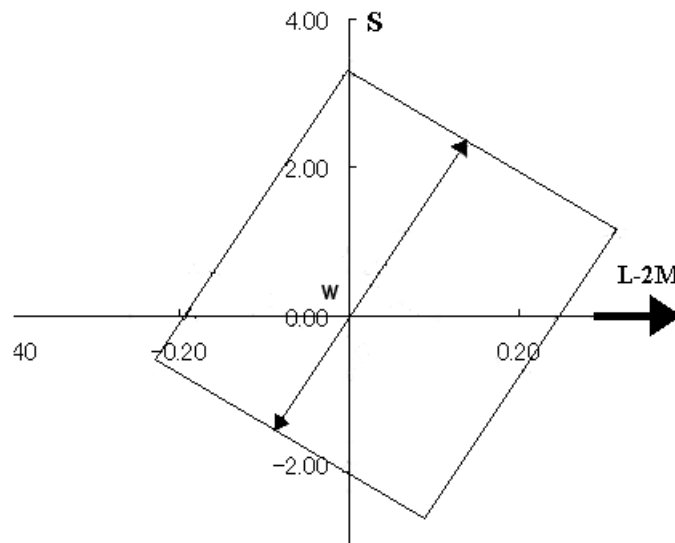


図 3.50 順応色が赤のときの赤方向と緑方向の閾値の取り方，横軸に L-2M，縦軸に S をとっている．太い矢印は順応方向 (赤) を示し，細い矢印は赤方向，緑方向の閾値を示す．

は ON 鋸波状テスト刺激，'OFF' は OFF 鋸波状テスト刺激のことである．また，図の点線は順応無しの場合の閾値を示している．*は赤方向と緑方向の閾値の間に有意水準 5 % で有意差があることを示している*¹．

順応色が赤の場合は多くの実験条件で赤方向の閾値の方が緑方向の閾値よりも大きかった．特に順応刺激 3 を用いた実験の時にその非対称性が多く見られた．順応刺激 2 を使った実験 (実験 2) の結果は被検者 MH については実験 1 と同様に赤方向への閾値の方が緑方向のものよりも大きくなる傾向を示したが，被検者 YF については赤，緑方向の閾値がほぼ同じくらいであった．順応色が赤の場合，順応刺激 3 を使った実験 (実験 3, 5, 7) での赤方向の閾値は順応刺激 4 を使った実験 (実験 4, 6, 8) での赤方向の閾値よりも大きくなる傾向を示した．順応刺激 1 を使った実験 (実験 1) の結果は被検者 YF, MH とともに赤方向のほうが閾値が大きくなる傾向を示した．また，テスト刺激の違いによる閾値上昇の傾向の違いは見られなかった．

順応色が緑の場合は，順応色が赤の場合とは異なり，緑方向の閾値の方が赤方向よりも大

*¹ 有意差の求め方は巻末の付録 B を参照

きいという非対称性があまり見られず，全体的に閾値の上昇が小さかった。

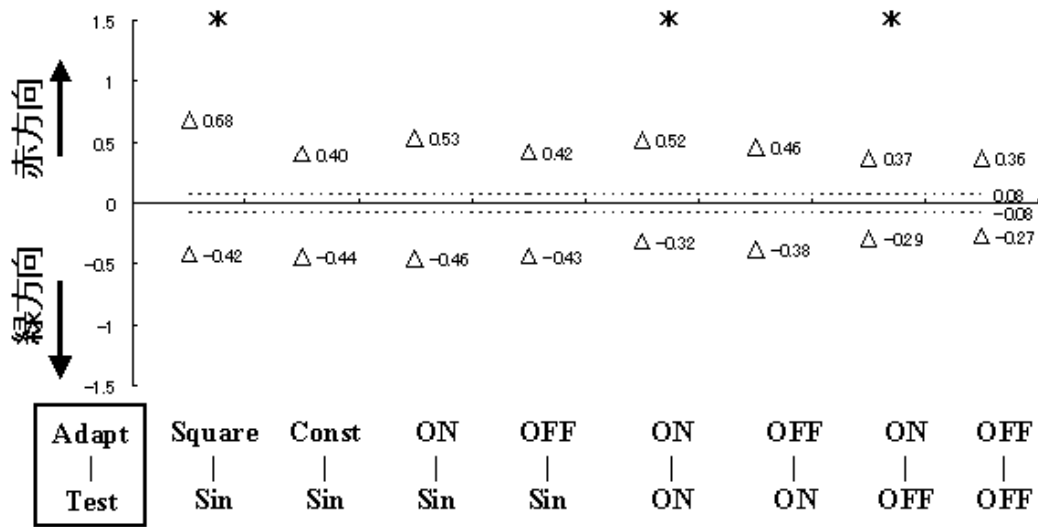


図 3.51 被験者 YF の赤方向と緑方向の閾値 (順応色赤)，縦軸のプラスは赤方向，マイナスは緑方向の閾値を示す．図の点線は順応無の場合の閾値を示す．

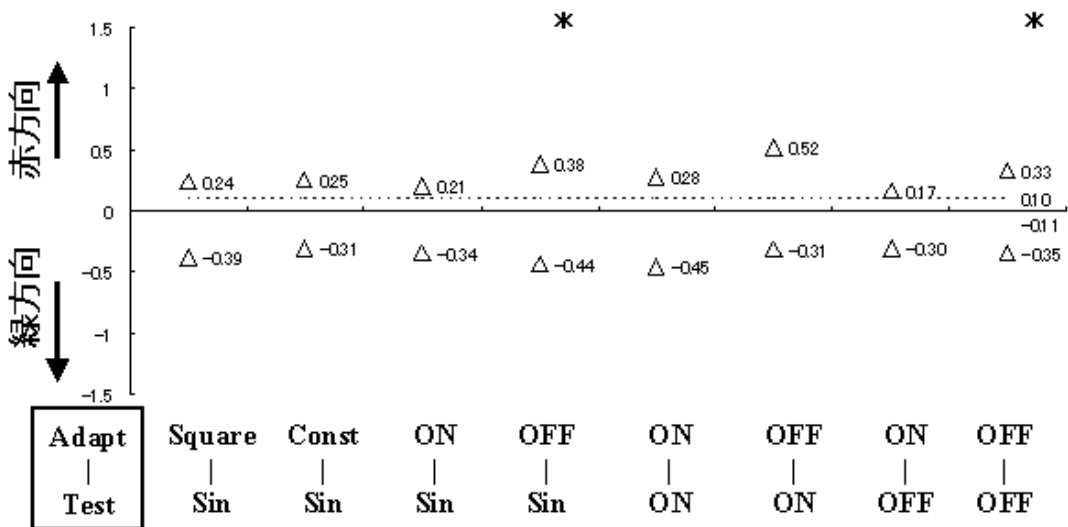


図 3.52 被験者 YF の赤方向と緑方向の閾値 (順応色緑)，縦軸のプラスは赤方向，マイナスは緑方向の閾値を示す．図の点線は順応無の場合の閾値を示す．

3.2 赤方向と緑方向の色弁別閾値の比較

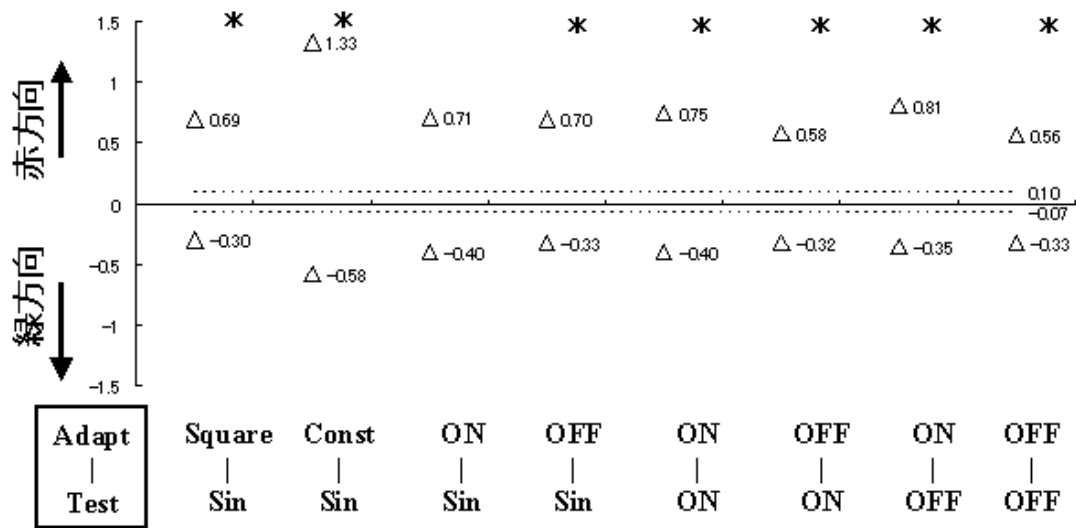


図 3.53 被験者 MH の赤方向と緑方向の閾値 (順応色赤), 縦軸のプラスは赤方向, マイナスは緑方向の閾値を示す. 図の点線は順応無の場合の閾値を示す.

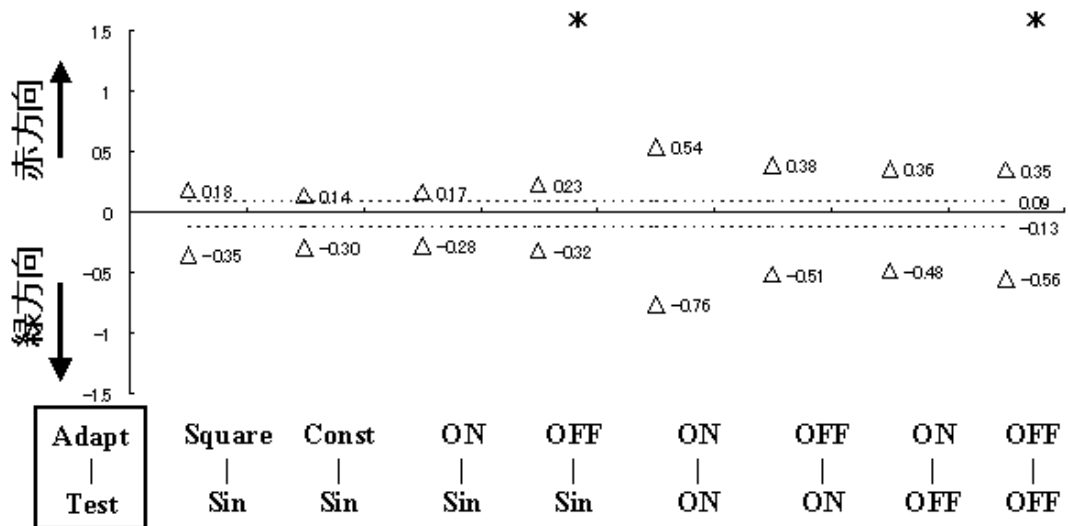


図 3.54 被験者 MH の赤方向と緑方向の閾値 (順応色緑), 縦軸のプラスは赤方向, マイナスは緑方向の閾値を示す. 図の点線は順応無の場合の閾値を示す.

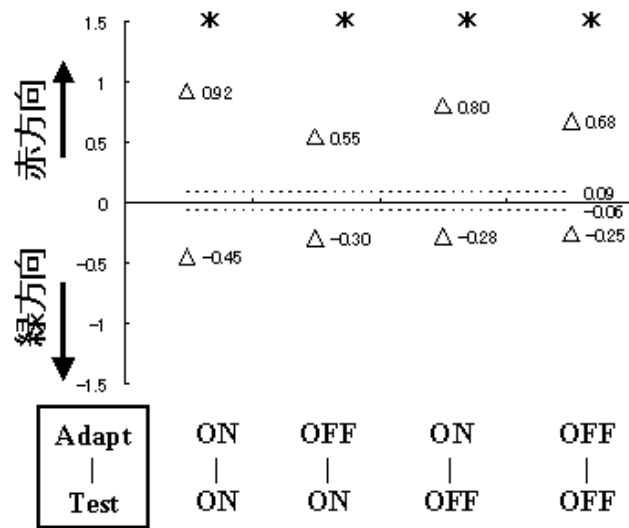


図 3.55 被験者 SI の赤方向と緑方向の閾値 (順応色赤), 縦軸のプラスは赤方向, マイナスは緑方向の閾値を示す. 図の点線は順応無の場合の閾値を示す.

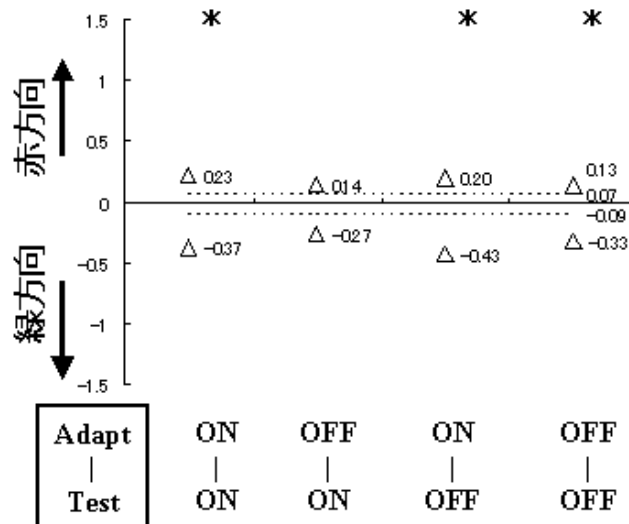


図 3.56 被験者 SI の赤方向と緑方向の閾値 (順応色緑), 縦軸のプラスは赤方向, マイナスは緑方向の閾値を示す. 図の点線は順応無の場合の閾値を示す.

3.2 赤方向と緑方向の色弁別閾値の比較

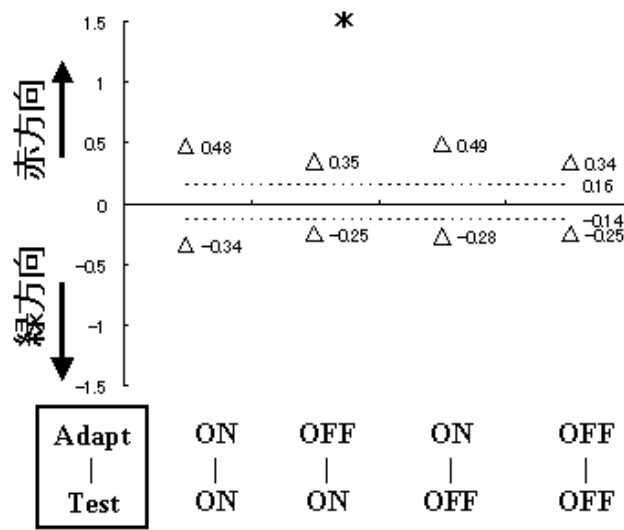


図 3.57 被験者 RO の赤方向と緑方向の閾値 (順応色赤), 縦軸のプラスは赤方向, マイナスは緑方向の閾値を示す. 図の点線は順応無の場合の閾値を示す.

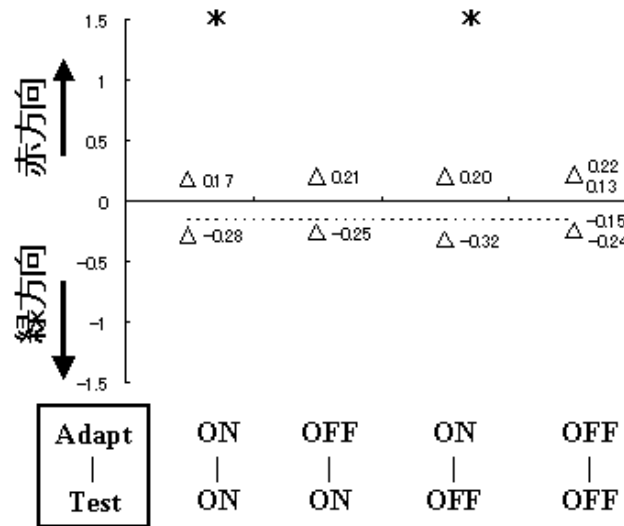


図 3.58 被験者 RO の赤方向と緑方向の閾値 (順応色緑), 縦軸のプラスは赤方向, マイナスは緑方向の閾値を示す. 図の点線は順応無の場合の閾値を示す.

第 4 章

考察

4.1 OFF 応答の影響による反対色方向への順応効果の有無

順応刺激 1(矩形波順応刺激) と順応刺激 3(ON 鋸波状順応刺激), 4(OFF 鋸波状順応刺激) を用いた順応後の閾値を比較することによって順応色から白色へ色度が急に変化するときの OFF 応答の影響について考える。

順応刺激 1 を用いた実験での閾値上昇と順応刺激 3, 4 を用いた実験の閾値上昇では, 順応色方向と反対色方向の閾値上昇に差が見られなかった。

このことから, 順応刺激 1 のような矩形波での順応では, 順応色から白色への色交替時に, OFF 応答の影響を受け順応色方向とは反対色方向も順応してしまうと考えられたが, 実際には OFF 応答による影響はほとんど無いと考えられる。

しかし, 順応刺激 4 を用いた実験では順応色方向とそ方向での閾値上昇の間に有意差が見られないものも多くあった。特に, 被検者 YF の結果は順応色方向とその反対方向での閾値上昇が対称になるものもあった。このことから, 順応刺激 1 を用いた実験では OFF 応答の効果よりも, 白色から順応色へ急激に色度が変化するときの ON 応答の効果の方が強いために, 非対称な閾値上昇の結果を示したとも考えられる。

以上より, OFF 応答の効果はあったとしても順応色方向とは反対の方向に大きく閾値を上昇させる程の効果は無いものと考えられる。

4.2 定常光順応刺激での閾値上昇の傾向

順応刺激 2(定常光順応刺激) は他の順応刺激と錐体レベルでの刺激量が異なるのと考えられるので、平行四辺形の辺の傾きを変えて近似を行った。その結果、他の順応刺激での実験結果よりも閾値の平行四辺形が順応色の方向へ長くなるようなものになった(図 4.1)。これは、順応刺激 2 での順応は、他の順応刺激での順応よりも L, M 錐体への刺激が強かったためであると考えられる。

被験者 YF と被験者 MH では順応色方向と反対方向への閾値上昇の非対称性を比較すると、MH のほうが非対称性が強く出ていた。順応刺激 2 による実験結果を見ると YF は順応方向と反対方向の閾値上昇が同程度なのに対して、MH は順応方向に大きく上昇している。順応刺激 2 での順応が錐体レベルでの順応であると考え、MH は錐体レベルで順応方向へ強く順応しているということが考えられる。

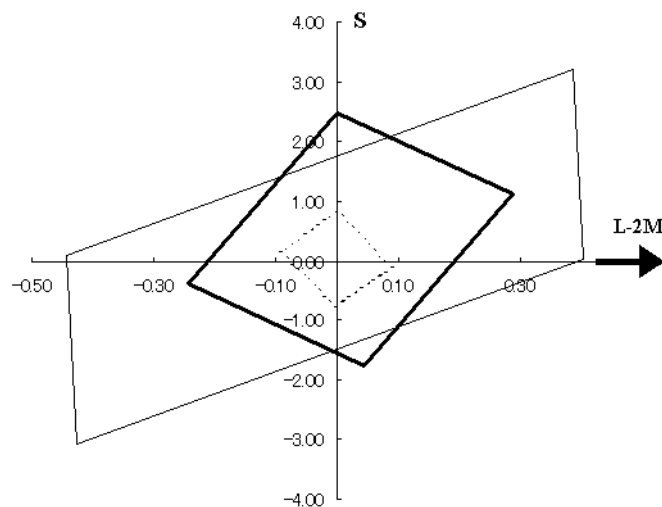


図 4.1 順応刺激 2(定常光順応刺激) を用いた場合と順応刺激 3(ON 鋸波状順応 刺激) を用いた場合の閾値上昇の傾向比較、点線は順応無しの場合の閾値、細い実線は実験 2 での閾値、太い実線は実験 5 での閾値、矢印は順応方向を示している。

4.3 ON 鋸波状テスト刺激と OFF 鋸波状テスト刺激の閾値上昇の比較

現在，順応色が青の ON 鋸波状順応刺激を用いて順応を行った場合に ON 鋸波状テスト刺激での上昇閾値が OFF 鋸波状テスト刺激での閾値上昇よりも大きくなるという報告 [6] がある．このことから，順応色が赤の場合でも同様の結果が得られることが考えられた．もし，このような ON と OFF が別々に順応されているような結果が得られるとすれば，R チャンネルは ON，OFF チャンネルを持つという事が言える．

実験 5(ON 鋸波状順応刺激-ON 鋸波状テスト刺激) と実験 7(ON 鋸波状順-応刺激 OFF テスト刺激) の順応色方向への閾値上昇を比較したところ，閾値上昇の大きさに差は見られなかった．同様に，実験 6(OFF 鋸波状順応刺激-ON 鋸波状テスト刺激) と実験 8(OFF 鋸波状順-応刺激 OFF テスト刺激) の順応色方向への閾値上昇を比較しても，閾値上昇に差は見られなかった．このように，テスト刺激の違いによる閾値上昇の違いというものは見られなかった．このことから，反対色チャンネルが ON，OFF チャンネルに分かれているという結果は得られなかった．しかし，今回の実験では ON と OFF テストを同じセッションで行わなかったのでこの問題に対して精度良く答えることはできなかったと考えられる．

4.4 順応色が赤のときの閾値上昇の非対称性

順応色が赤の時に，赤方向の閾値が緑方向の閾値よりも大きくなるという閾値上昇の非対称性が見られた．この非対称な閾値上昇の傾向について，R-G チャンネルが単一なメカニズムのときと，R，G チャンネルがそれぞれ独立なメカニズムのときに予想される閾値上昇の傾向と比較し，R，G チャンネルの独立性について検討した．

図 4.2 は，R-G チャンネルが単一なメカニズムのときの赤，緑方向に対する閾値決定メカニズムの流れを表している．このメカニズムは，L，M 錐体からの入力を受けそれらの差を取った値 Z に対して $R(Z)$ という非線型な応答をする．図 4.3 は単一なメカニズムでの応答関数を示している．図の縦軸は応答の変化量，横軸は L，M 錐体の組み合わせによる信

号量 Z を示しており， $Z > 0$ は赤方向を， $Z < 0$ は緑方向を示している．応答の変化量が一定の値 $\Delta R = k$ となったときに背景白色とある色とを弁別することが可能になる．つまり，色弁別閾値に達したことになる．この k 得るために必要な錐体からの信号量 ΔZ が色弁別閾値となる．順応をしていない状態では $Z = 0$ の点が背景白色の点であり，このとき一定の応答の変化量 k を得るのに必要なプラス方向の錐体からの信号量 $+DeltaZ$ が赤方向の閾値，逆にマイナス方向の信号量 $-DeltaZ$ が緑方向の閾値となる．順応をしていない状態では，赤方向と緑方向の閾値はほぼ同程度になる．

赤で色順応したとき，錐体が赤に順応することによって，3種類の錐体の内，L錐体が強く順応し，L錐体からの信号量が減少する．従って，背景白色での錐体からの信号量は $Z = 0$ とならずに $Z < 0$ となり，図の W' が順応後の背景白色点となる．赤で順応した状態では，赤方向の閾値は $+DeltaZ'$ となり順応前よりもやや上昇する．また，緑方向の閾値は $-DeltaZ'$ となり順応前よりも大きく上昇する．赤で順応したときの赤方向と緑方向の閾値を比較すると，赤方向の閾値よりも緑方向の閾値が大きくなり，閾値上昇の傾向は，実験で得られた結果とは反対になる．このことから，R-Gチャンネルは，このような単一のメカニズムではないと考えられる．

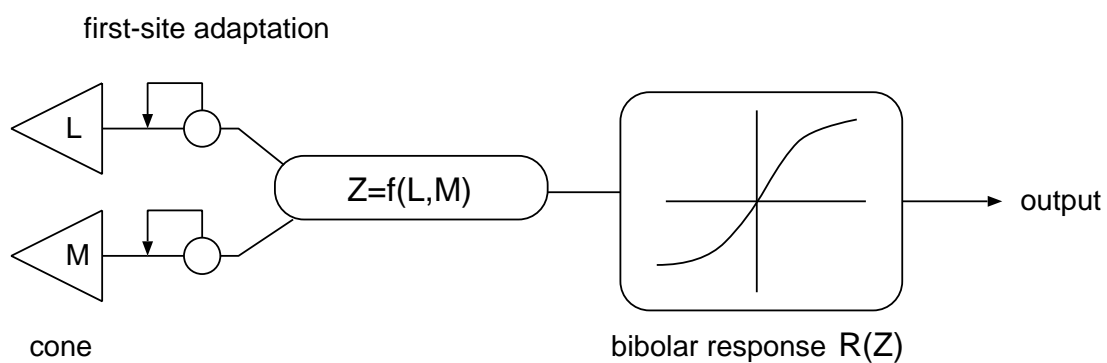


図 4.2 単一のメカニズムのときの L, M 錐体からの入力による赤, 緑の処理経路.

4.4 順応色が赤のときの閾値上昇の非対称性

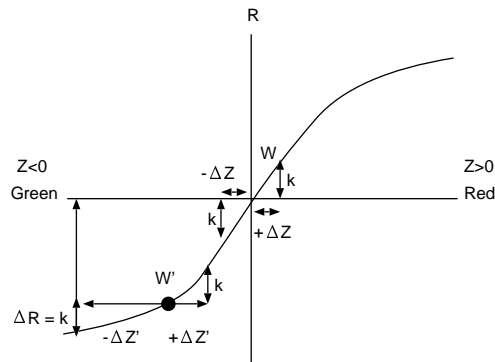


図 4.3 単一なメカニズムのときの応答関数．縦軸は応答の変化量，横軸は L, M 錐体の足し合わせによる信号を示している．

図 4.4 は, R, G チャンネルがそれぞれ独立なメカニズムのときの赤, 緑方向に対する閾値決定メカニズムの流れを表している．このメカニズムでは, R, G チャンネルがそれぞれ別々に L, M 錐体からの入力を受け, 異なる応答をする．このとき, それぞれの応答関数は図??のように R チャンネル (??右) では錐体からの信号量 Z_R が正のときのみ, G チャンネル (4.5 左) では錐体からの信号量 Z_G が負のときのみ応答する関数となる．順応をしていないときの背景白色点の位置は, 単一のメカニズムのときと同様に原点である．順応をしていないとき, R チャンネルでは, 赤方向の閾値は $+\Delta Z_R$ となるが, $Z_R < 0$ では応答をしないので, 負の方向へ錐体からの信号量を変化させても一定の応答の変化量 k を得ることができず, 緑方向の閾値は得られない．逆に G チャンネルでは緑方向の閾値は $-\Delta Z_G$ となるが, 赤方向の閾値を得ることができない．よって, 最終的な赤方向の閾値は $+\Delta Z_R$, 緑方向の閾値は $-\Delta Z_G$ となる．

赤で順応したとき, R チャンネルでは, 赤方向の閾値は $+\Delta Z'_R$ となり, 緑方向の閾値は得られない．G チャンネルでは, 錐体での順応効果が強いときには $+\Delta Z'_G$ で赤方向の閾値に達する．このとき, $+\Delta Z'_G$ が $+\Delta Z'_R$ よりも小さくなるため赤方向の閾値は $+\Delta Z'_G$ になると考えられる．従って, 錐体での順応効果が強いときは, 単一のメカニズムのときと同様に, 緑方向の閾値が赤方向の閾値よりも大きくなり, 実際の結果と一致しない．しかし, 錐体での順応効果が弱いとき, 図??(左) のように, G チャンネルにおいて, 正の方向へ錐体が

らの信号量を変化させても，一定の応答の変化量 k を得ることができず，赤方向の閾値には達しない．このときの赤方向と緑方向の閾値はそれぞれ， $+\Delta Z'_R$ ， $-\Delta Z'_G$ となり，赤方向の閾値が緑方向の閾値よりも大きくなり，実験で得られた結果と一致する．このことから，R，G チャンネルは独立なメカニズムであると考えられる．

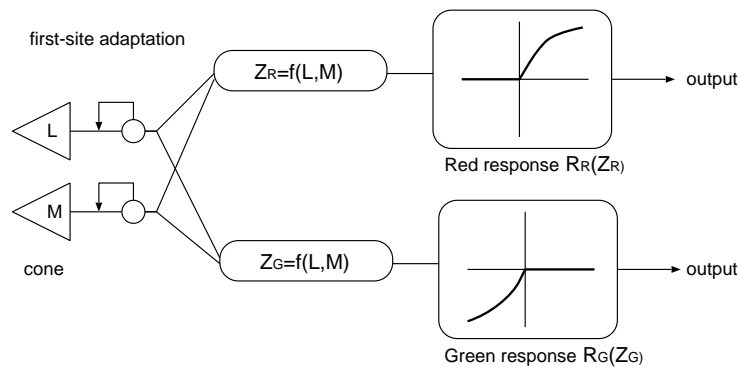


図 4.4 独立なメカニズムのときの L，M 錐体からの入力による赤，緑の処理経路．

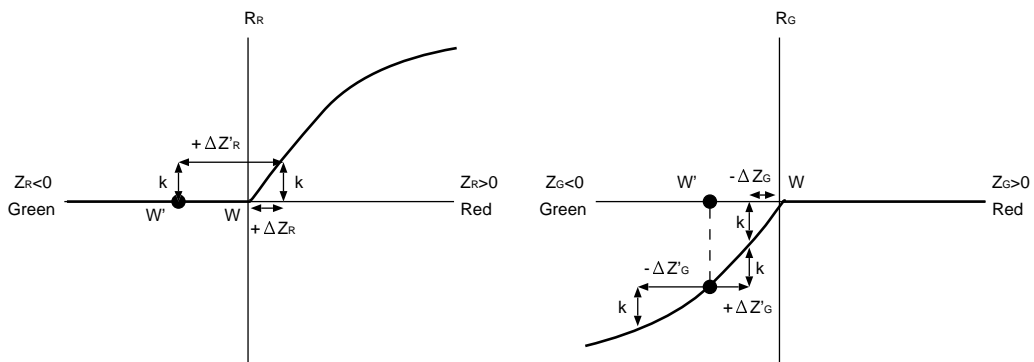


図 4.5 独立なメカニズムのときの応答関数（錐体での順応効果が強いとき）．右は R チャンネルの応答関数，左は G チャンネルの応答関数 縦軸は応答の変化量，横軸は L，M 錐体の足し合わせによる信号を示している．

4.5 順応色が緑のときの閾値上昇

順応色が緑のときの結果は，順応色が赤のときの結果程非対称な閾値上昇が見られなかった．表 4.1 は実際に実験に用いた順応刺激の L，M，S 錐体への刺激量と，赤から白色，緑

4.5 順応色が緑のときの閾値上昇

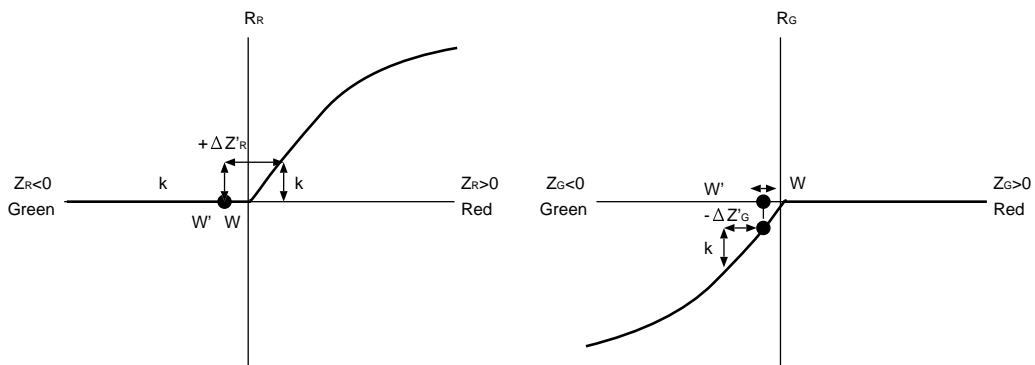


図 4.6 独立なメカニズムのときの応答関数（錐体での順応効果が弱いとき）．右は R チャンネルの応答関数，左は G チャンネルの応答関数 縦軸は応答の変化量，横軸は L, M 錐体の足し合わせによる信号を示している．

から白色へ順応刺激が変化したときの錐体への刺激量の変化を示したものである．このとき，順応色が赤のときと緑のときで， M 錐体への刺激変化量を比較してみると緑から白色へ変化するときの方が，赤から白色へ変化するときよりも明らかに小さい．このことから，順応色が緑のときは，赤で順応したときよりも順応効果が弱かったために，順応方向とその反対方向の閾値上昇の間に有意差が現れなかったと考えられる．

	赤	白色	変化量 (赤-白色)
L(td)	4967.056	4157.438	809.618
M(td)	1304.819	2083.650	-778.831
S(td)	6143.490	6373.475	-229.985

	緑	白色	変化量 (緑-白色)
L(td)	3807.747	4157.438	-349.691
M(td)	2489.889	2083.650	406.240
S(td)	6502.722	6373.475	129.248

表 4.1 順応色赤 (上) と緑 (下) のときの錐体刺激の変化量, 赤は順応色赤 ($2000\text{cd}/\text{m}^2$) の錐体への刺激量, 緑は順応色緑 ($2000\text{cd}/\text{m}^2$) の錐体への刺激量, 白は白色 ($2000\text{cd}/\text{m}^2$) 錐体への刺激量, 変化量 (赤-白色) は赤から白色へ変化したときの錐体刺激の変化量, 変化量 (緑-白色) は赤から白色へ変化したときの錐体刺激の変化量示す.

4.6 今後の課題

今後の課題としては以下のような3点が上げられる.

- 1) . ON, OFF チャンネルの有無を調べるために ON と OFF のテストを同じセッションで行い, そのときの ON テストと OFF テストの順応色方向への閾値上昇を比較する必要がある. もし, このとき ON 鋸波状順応刺激で順応したときに ON テストの方が, OFF テストよりも閾値上昇が大きく, OFF 鋸波状順応刺激で順応したときに OFF テストのほうが, OFF テストよりも閾値上昇が大きくなれば, ON と OFF チャンネルが存在しているということになるだろう.
- 2) . G チャンネルの独立性を調べるために, 緑の順応色を今回用いたものよりも順応効果が強いものに変えて実験を行う. もし, G チャンネルが R チャンネルに対して独立であるならば, 順応色が赤のときのような閾値上昇の非対称性が見られると考えられる.

4.6 今後の課題

3) . 検討した独立なメカニズムが正しいかどうかを調べるために , 赤の順応色を今回用いたものよりも順応効果が強いものに変えて実験を行う . もし , 検討したメカニズムが正しければ , 順応効果を強くすると , 緑方向の閾値が赤方向の閾値よりも大きくなるという , 現在の結果とは反対の閾値上昇の非対称性が見られると考えられる .

第 5 章

結論

今回の実験の結果，順応色が赤の場合に見られた，赤方向への閾値上昇が緑方向の閾値上昇よりも大きくなるという結果は，R チャンネルが G チャンネルに対して独立であることを示唆している．順応色が緑の場合にも，非対称な閾値上昇の傾向が少しは見られたが，G チャンネルが R チャンネルに対して独立であるというには不十分な結果であった．順応色が緑の場合に，閾値上昇の非対称性があまり見られなかったのは，順応効果が弱く，順応色方向と反対色方向への閾値上昇が小さかったためであると考えられる．そこで，この点について考慮するために，今回の実験で用いた緑の順応色を，より順応効果が強いものに変える必要があるだろう．また，今回検討した R，G チャンネルが独立なメカニズムが正しいかどうかを検討するために，赤の順応色についても，より順応効果が強いものに変える必要があるだろう．

順応刺激 1 での反対色方向への閾値上昇が，順応刺激 3，4 でのものとほぼ同じであるという結果から，順応色から白色への色交替時に，時間的な OFF 応答の影響による影響は無かったと考えられる．このことは，順応刺激 1 を用いた実験の結果によって得られた閾値上昇の非対称性が，R，G チャンネルの独立性を示唆するものであることを強く支持している．また，テスト刺激の違いによる閾値上昇の大きさの違いは見られず，R チャンネルが更に ON，OFF チャンネルを持っているかどうかは分からなかった．今後，ON，OFF チャンネルの有無について調べるために，ON 鋸波状テスト刺激と OFF 鋸波状テスト刺激によるテストを同じセッションで行い，それぞれの結果を比較する必要があるだろう．

謝辞

高知工科大学情報システム工学科の篠森敬三助教授には，本研究を進める上で大変多くの御時間を割いて頂き，また，多くのご指導を頂いたことを心より感謝致します．高知工科大学の学生である平山正治様，五百蔵慎一様，大久保 龍馬様には，お忙しい中，被験者として多くの実験に参加して頂き，ご協力頂きました．また，日本視覚学会 2001 冬期大会，日本視覚学会 2003 冬期大会，ACV2001(The First Asian Conference on Vision) 及び ACV2002(The Secound Asian Conference on Vision) におきましてさまざまな御助言を頂いた他大学の先生方，実験で使用した液晶プロジェクタを貸して下さった高知工科大学情報システム工学科の福本昌弘助教授，そして，日ごろより研究以外の面でもお世話になっている高知工科大学情報システム工学科の先生方に心より感謝致します．

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] 内川 恵二, 「色覚のメカニズム」, 朝倉書店, 1998 .
- [2] J . Krausopf , D . R . Williams and D . W . Heeley : “Cardinal directions of color space , ” *Vision Research* , 22(1982) 1123-1131 .
- [3] M . A . Webster and J . D . Mollon : “Change in color appearance , ” *Nature* , 349(1991) 235-238 .
- [4] 「視覚情報処理ハンドブック」, 日本視覚学会編, 朝倉書店, 2000 .
- [5] James S. McLellan, Rhea T. Eskew Jr : “ON and OFF S-cone pathways have different long-wave cone inputs” *Vision Research* , 40(2000) , 2449-2465 .
- [6] K . Shinomori , L . Spillmann and J . S . Werner : “S-cone signals to temporal OFF-channels , asymmetrical conections to postreceptoral chromatic mechanisms , ” *Vision Research* , 39(1982) 39-49 .

付録 A

生理学的知見

人間の眼に入射した光は網膜内では、錐体、桿体の光受容器、水平細胞、双極細胞、アマクリン細胞、神経節細胞を経て処理される。網膜の出力細胞である神経節細胞には、図 A.1 のように網膜上の受容野の中心部は L 錐体から正の入力を、周辺部では M 錐体からの負の入力を受けて応答する細胞がある。このような神経節細胞の多くは、図 A.2(左) のように L-M が正、即ち赤の光を受けたときも、L-M が負、即ち緑の光を受けたときも応答をする。しかし、同じような受容野を持つ細胞であっても、図 A.2(右) のように L-M が負のときには応答しないようなものもあることが分かっている。

また、このような受容野の中心部は L 錐体から正の入力を、周辺部では M 錐体からの負の入力を受けるものとは逆の、中心部は M 錐体から正の入力を、周辺部では L 錐体からの負の入力を受けるような受容野を持つ神経節細胞もある。この神経節細胞でも、M-L が正のときのみ応答する、即ち、緑の光のみに対して応答するような細胞がある。

このように、神経節細胞のレベルでは、赤と緑で独立な応答をする細胞が存在するということから、それよりも高次レベルでも赤と緑を別々に処理する経路が存在する可能性があると考えられる。

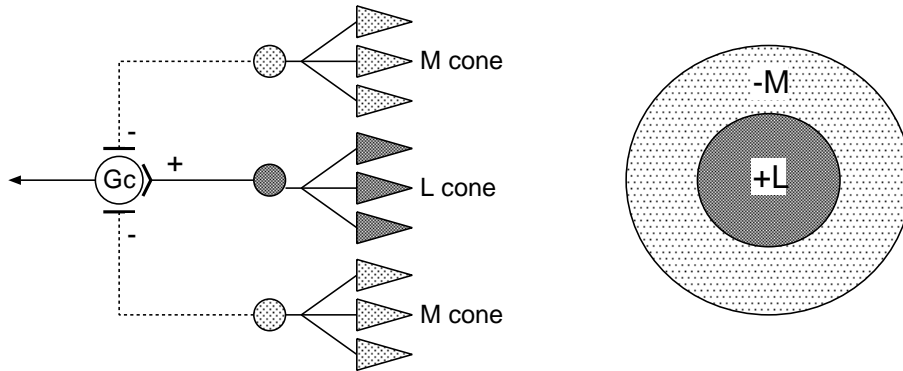


図 A.1 神経節細胞の受容野の例，Gc は神経節細胞，L，M cone は L，M 錐体を示している。

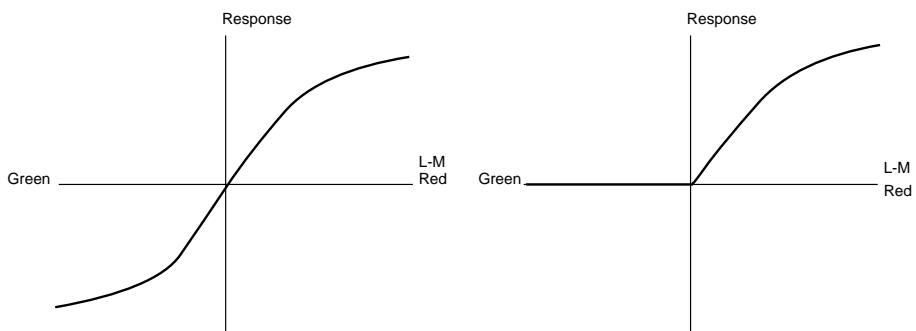


図 A.2 受容野の応答，横軸は錐体からの入力 L-M を，縦軸は応答を示している．左は赤と緑どちらの光に対しても応答する神経節細胞の応答，右は赤のみに対して応答する神経節細胞の応答

付録 B

有意差の求め方

赤方向と緑方向の閾値の有意差を調べるために以下のような方法を用いた。以下の図 B.1 で示すように平行四辺形の赤方向、緑方向の各辺 (図 B.1 の太線) に垂直な直線に、平行四辺形の辺を近似するために用いたデータ点を投影した。各データ点には 3 回分の実験結果を用いた。この点と W を垂直な直線に投影した点 W' との距離を赤方向と緑方向の閾値として、統計解析を行い有意差を求めた。

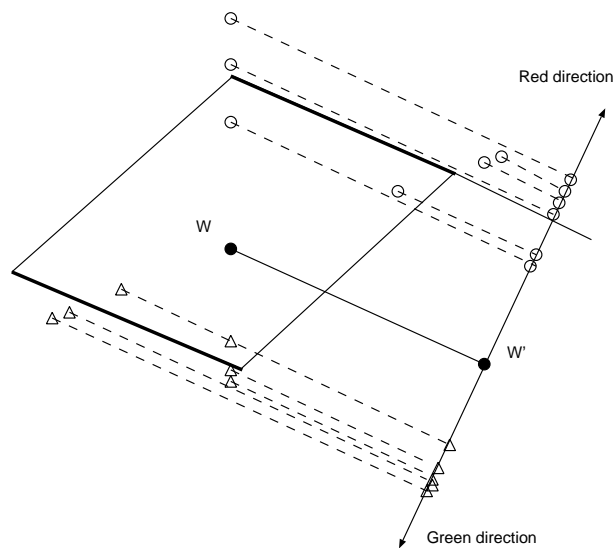


図 B.1 統計解析を行う点。○：赤方向のデータ点，△：緑方向のデータ点。 W' ： W を垂直な直線に投影した点。

	順応色赤				順応色緑			
	YF	MH	SI	RO	YF	MH	SI	RO
実験 1	有	有	-	-	無	無	-	-
実験 2	無	有	-	-	無	無	-	-
実験 3	無	無	-	-	無	無	-	-
実験 4	無	有	-	-	無	有	-	-
実験 5	有	有	有	無	無	無	有	有
実験 6	無	有	有	有	有	無	無	無
実験 7	有	有	有	無	有	無	有	有
実験 8	無	有	有	無	無	有	有	無

表 B.1 各実験における赤方向と緑方向の閾値での有意差の有無

表 B.1 は各実験での有意差の有無を示したものである。