

平成 13 年度
学士学位論文

他眼順応刺激による色順応効果

Chromatic Adaptation Effect on one eye by
Chromatic Stimuli presented to the other eye

1020273 梶原 誠

指導教員 篠森 敬三

2002 年 2 月 8 日

高知工科大学 情報システム工学科

要旨

他眼順応刺激による色順応効果

梶原 誠

反対色チャンネルが赤-緑，青-黄チャンネルという単一なチャンネルなのか，それとも，赤，緑，青，黄のという独立なチャンネルなのか検討するために，両眼を使い，網膜より比較的高次な場所，両眼融合体以降の領域である外側膝状体以降の領域での色順応効果を調べた．

順応刺激は，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，黄を定常的に呈示する刺激（順応条件2）と，白色と順応条件2の赤，緑，青，黄を0.5Hzで等輝度交替させる刺激（順応条件3）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）を組み合わせで用いた．

色順応後の閾値上昇は，順応条件が3の場合は，各色方向に対称な閾値の上昇がみられた．順応色が赤以外では，順応効果がみられ，各色方向に対称な閾値上昇がみられた被験者と，順応効果自体があまりみられない被験者がいた．この結果は，片眼を刺激することで，外側膝状体以降の影響が片眼へも伝わるのが，明らかとなったが，その影響の伝わり方には個人差がある結果となった．また，反対色チャンネルの独立性については，同一眼への色順応と同様に，反対色チャンネルの独立性を示唆しない結果であった．

キーワード 反対色チャンネル，色交替刺激，選択的順応

Abstract

Chromatic Adaptation Effect on one eye by Chromatic Stimuli presented to the other eye

We examine chromatic adaptation effect (CAE) which is higher level than retina by chromatic stimuli presented to the other eye, in order to investigate whether red, green, blue, and yellow channels in opponent color channels are independent each other or not.

We used an adaptation stimulus (adaptation condition 2) which is presented stationary adaptation stimuli those red, green, blue or yellow on the cone axis which is on deutanopic confusion line and tritanopic confusion line or adaptation stimulus (adaptation condition 3) which is switched from white to red, green, blue or yellow on the same cone axis. Test stimuli is spatial Gaussian shape and do changing a temporal form varying sinusoidally, were presented in one of four quadrants on the CRT. 4AFC and staircase procedure was used to determine color discrimination thresholds at the time.

As a result, it was showed rise thresholds to symmetry each color used test stimuli in adaptation condition 3. After all there were two case that one case was showed rise thresholds to symmetry each that colors by M.K, another case was showed color adaptation to little effect by T.S and M.H. Therefore, it was become clear infection with order effect over LGN from eye to another eye. But the infection was unlike each other. As for independent of opponent color channels, it wasn't showed independent in the same result of using both eyes.

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	反対色説	2
1.3	色順応	3
1.4	実験目的	3
第 2 章	実験方法	6
2.1	実験装置	6
2.2	順応刺激	7
2.2.1	順応条件 1(順応なし)	8
2.2.2	順応条件 2(定常刺激)	8
2.2.3	順応条件 3(Square)	9
2.2.4	色順応時の右眼の見え方	9
2.3	テスト刺激	10
2.4	実験手順	12
第 3 章	実験結果	14
3.1	順応条件 2	14
3.2	順応条件 3	23
第 4 章	考察とまとめ	33
4.1	他眼への色順応後の色弁別に対する影響	33
4.2	反対色チャンネルの 2 色の独立性について	35
4.3	被験者間の相違について	39

目次

第 5 章 今後の課題	40
謝辞	41
参考文献	42

目次

1.1	L,M,S 錐体の分光感度	1
1.2	色覚モデル	2
2.1	実験装置	7
2.2	xy 色度図上での順応軸と順応色	8
2.3	順応条件 2 の順応刺激の時間と輝度の図	9
2.4	順応条件 3 の順応刺激の時間的变化図	9
2.5	色順応時の右眼の見え方	10
2.6	テスト刺激の時間的变化図.	10
2.7	テスト刺激の呈示場所.	11
2.8	色弁別実験における色方向	11
2.9	実験の流れ	12
3.1	順応条件 2 , 順応光が赤の被験者 M.K の結果	15
3.2	順応条件 2 , 順応光が赤の被験者 T.S の結果	16
3.3	順応条件 2 , 順応光が緑の被験者 M.K の結果図	17
3.4	順応条件 2 , 順応光が緑の被験者 T.S の結果	18
3.5	順応条件 2 , 順応光が青の被験者 M.K の結果	19
3.6	順応条件 2 , 順応光が青の被験者 T.S の結果	20
3.7	順応条件 2 , 順応光が黄の被験者 M.K の結果	21
3.8	順応条件 2 , 順応光が黄の被験者 T.S の結果	22
3.9	順応条件 3 , 順応光が赤の被験者 M.K の結果	23
3.10	順応条件 3 , 順応光が赤の被験者 T.S の結果図	24
3.11	順応条件 3 , 順応光が赤の被験者 M.H の結果	25

図目次

3.12 順応条件 3 , 順応光が緑の被験者 M.K の結果	26
3.13 順応条件 3 , 順応光が緑の被験者 T.S の結果	27
3.14 順応条件 3 , 順応光が緑の被験者 M.H の結果	28
3.15 順応条件 3 , 順応光が青の被験者 M.K の結果	29
3.16 順応条件 3 , 順応光が青の被験者 T.S の結果図	30
3.17 順応条件 3 , 順応光が黄の被験者 M.K の結果	31
3.18 順応条件 3 , 順応光が黄の被験者 T.S の結果	32
4.1 考察 4. 1 の比較のための結果図	34
4.2 考察 4.2 の検討のための被験者 M.K の赤の結果	37
4.3 考察 4.2 の検討のための被験者 M.K の青の結果	38
5.1 鋸状状波変化する順応刺激	40

第 1 章

はじめに

1.1 色覚のメカニズム

「正確に言えば光線に光はない．光線には様々な色の感覚を起こすある力と性質がある．」

という Newton の有名な言葉がある．つまり，色は眼で見るのではなく大脳で見ている．我々の眼は大脳へ色の波長の応答を送っている．人間の網膜上には L，M，S 錐体と呼ばれる 3 種の光受容器が存在する．3 種の錐体はおよそ 400nm 700nm の波長に対して図 1.1 のような異なる分光感度を持ち，これにより人間は異なる波長の光を見分けることができる．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．また，色で言えば，L，M，S 錐体はそれぞれ赤，緑，青に対して感度が高い．

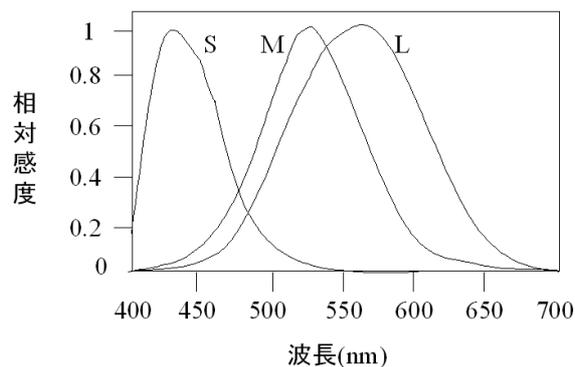


図 1.1 L,M,S 錐体の分光感度関数. 各関数は最大値が 1 より正規化してある (「色覚のメカニズム」より)

1.2 反対色説

図 1.2 は 3 錐体から反対色応答への一般的な変換モデルを示している。色覚応答はまず第 1 ステージの錐体から第 2 ステージの反対色・輝度チャンネルへと変換される。反対色チャンネルと輝度チャンネルは、錐体 L, M, S 応答の和と差をとることで応答を作り、更に第 3 ステージの高次レベルへと送られ、最終的な色の見えの応答に変換される。L, M, S 錐体から r/g 応答, y/b 応答, 輝度 Lu 応答への変換式は次のように定義されている。r/g 応答の変換式においては 2 式あるが, 0.05S 足されているのは短波長における赤みを説明するためである。

$$r/g = L - 2M \quad \text{あるいは} \quad L - 2M + 0.05S$$

$$y/b = (L + M) - S$$

$$Lu = (L + M)$$

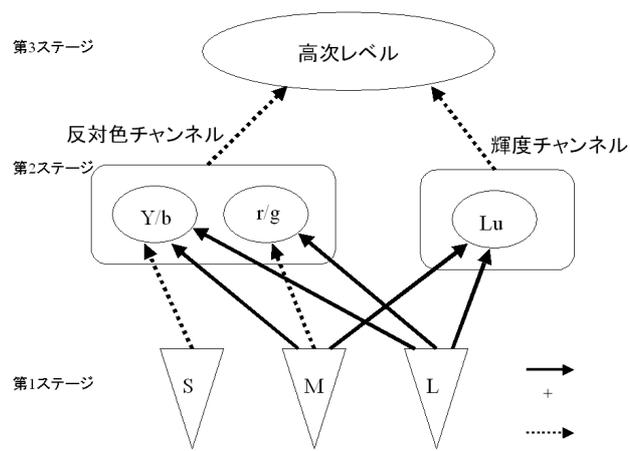


図 1.2 色覚モデル。錐体から反対色応答への変換を示す一般的な色覚モデル (「色覚のメカニズム」より)

1.2 反対色説

19 世紀にドイツの生理学者 Hering は、色には混ざり気のない純粋な色相があり、その他の色相は純粋な色相の組み合わせにより表現できることを発見した。純粋な色相とは赤、

1.3 色順応

緑，黄，青でこれをユニーク色相と呼んだ．さらに，赤みと緑み，黄みと青みがは同時に存在しないと主張した．赤と緑，あるいは黄と青をそれぞれ反対色と呼んだ．このように赤みと緑み，あるいは黄みと緑みが同時に存在しない考えを反対色説という．この赤と緑，黄と青のチャンネルは赤-緑，黄-青のように対であるか，それともそれぞれ独立したチャンネルなのかははっきり解っていないが，現在の所，独立でないと考えられている．

1.3 色順応

色順応とは，色光をしばらく見ていると，はじめ鮮やかに見えていた色が次第に薄れて色みがなくなっていく現象である．例えば，赤い光をしばらく見ていた後に別の赤い紙などを見ると，赤い光を見ていない場合より紙の赤みが薄れて白く見える．この色順応のメカニズムは，3種の錐体の選択的な感度変化やそれ以降のレベルにおいての反対色的な順応の組み合わせによって説明される．日常生活における一般的な照明環境におけるの色順応については，3種の錐体選択的な感度変化によってほとんどの場合が説明が可能である．そこで，3種の錐体の色順応なしの場合の感度をそれぞれ s, m, l とすると，順応した場合の感度 s', m', l' の錐体の感度変化を von Kries の係数法則により記載する．

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

1.4 実験目的

反対色的チャンネルについて調べた実験として Krauskopf らの報告がある．彼らの実験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て，順応後の色弁別閾値を測定している．特定の軸条件として，青の輝度が一定となる軸と赤と緑の輝度の比が一定になる軸である．彼らはこの2つの軸について実験を行った結果として，色空間

1.4 実験目的

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。輝度軸と、赤-緑、黄-青軸である。彼らは、このように特定の軸に沿って順応した場合に選択的な順応を示すということは、反対色チャンネルのには2つの色チャンネルしかないということを示唆していると言っているが、反対色チャンネルはそれぞれが独立した4つの色チャンネルからなっているかもしれないとも言っている。その後、Websterらも色空間内の同じ軸を用いて実験を行った結果、選択的な順応効果が見られるという報告をしている。

しかし、両者の順応刺激は反対色の両方の変化する刺激（例えば赤 緑）を用いるので、その刺激では反対色チャンネルの両方を刺激してしまうと考えた。そこで、錐体混同色線上の片方の色と白色を等輝度色交替（例えば白 赤）する順応刺激を用いて、反対色チャンネルの分離を試みた実験が前回の内容である（参考文献：1）。錐体混同色線上とは3種の錐体のうちのどれかが無い場合に区別できない色の1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に見える。

反対色チャンネルを構成する2色（例えば赤と緑）が同一チャンネルの正や負で表現されるのか、あるいは赤チャンネルと緑チャンネルという2つの独立したチャンネルより構成されているのかはまだ明らかでない。色覚モデルなどの観点からは、独立したチャンネルであると考えたと実験結果をよりよく説明できる。また、生理学的な観点からは、 $L_{center}M_{surround}$ の受容野と $M_{center}L_{surround}$ その一方で、心理物理学的に反対色の2つの色チャンネルが互いに独立しているという証拠は得られていない。前回の実験結果に関しても、矩形波や鋸波での順応下での色弁別閾値の上昇は各反対色チャンネルに対して対称であり、2色の独立性を示していない結果であった。

前回の実験では単眼のみを使用している。これは、例えば、錐体レベルでの順応効果が非常に大きいと色弁別の結果がそれのみで決まってしまう可能性がある。反対色チャンネルの独立性を色順応で調べるのであれば、反対色チャンネル自体の順応効果を取り出す必要があるのではと考えた。そこで、今回の実験では、順応する眼と色弁別を調べる眼を変えること（他眼順応刺激）によって、両眼融合以降の領域である外側膝状体以降のみでの色順応の影響を色弁別実験によって調べることにした。これにより、比較的高次（外側膝状体以降）の色

1.4 実験目的

覚メカニズムにおける反対色チャンネルの 2 色の独立性の検討を行った。

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その他は黒い板でそれぞれ遮光をしている。被験者の入る場所のサイズは縦が 90cm，横が 90cm，180cm で，その中に椅子を設置しており，その椅子に座り顎台に顎をのせて実験を行う。この時の被験者の眼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。順応刺激の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 によって再び平行光に戻されて F，O，BS を通り被験者の右眼に呈示される。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 を閉じることによりプロジェクタからの光は完全に遮断される。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。またディスプレイの前には縦が 24.7cm，横が 31.5cm の開口部を持つ遮蔽板 1 を置き，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。ディスプレイは左眼からのみ見ることが可能であり，被験者の左眼には四角すいの筒をつけている。四角すいの上辺部には眼帯と遮蔽板をつけており，左眼の錐体に関与しないように設計してある。四角すいの筒の上辺部は眼帯をつけており，その眼帯から縦が 0.8cm，横が 1.3cm の穴と，底辺部には縦が 7.2cm，

2.2 順応刺激

6.3cm の穴がある．被験者の前には縦が 8.5cm，横が 14.3cm の開口部を持つ遮蔽板 2 があるが，その開口部を覆うような遮蔽板を四角すいの底辺部に設置しており，実際の開口部のサイズとしては底辺部の穴がそれにあたる．四角すいの筒は台の上に設置しており，各被験者が高さを自由に変えることができる．

テスト刺激の制御と順応刺激の切り替えのタイミングの制御は VSG2/3(cambridgeResearch System) によって行われた．

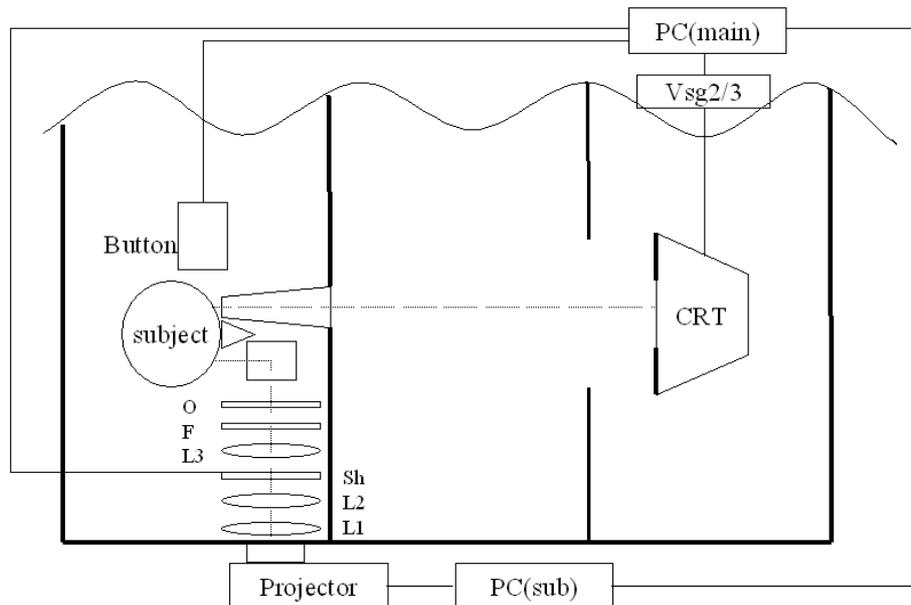


図 2.1 実験装置．L1, L2, L3: レンズ, O: オパール拡散ガラス, F: 熱線吸収フィルタ, Sh: シャッタ, BS: ビームスプリッタ

2.2 順応刺激

順応刺激には以下のような順応条件 1 ~ 3 を用いた (被験者 M.H のみ順応条件 1 と順応条件 2 の赤, 緑のみ)．図 2.2 で示すように xy 色度座標上で等エネルギー白色 ((x,y)=(0.333,0.333)) の点を通る第 2 色覚異常者の混同色線上, 第 3 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 R, G, B, Y とした．また, 等エネルギー白色の点を W, 第 2 色覚異常者の混同色線を D 軸 (Deuteranopic confusion

2.2 順応刺激

line), 第3色覚異常者の混同色線を T 軸 (Tritanopic confusion line) とする. それぞれの点の xy 色度座標は R(0.478,0.261), G(0.232,0.383), B(0.230,0.116), Y(0.415,0.474) である. 順応刺激の呈示はいずれも 6sec であり, 視覚 13.6° の正方形である. また各順応刺激はいずれも $2000\text{cd}/\text{m}^2$ の等輝度色交替刺激である.

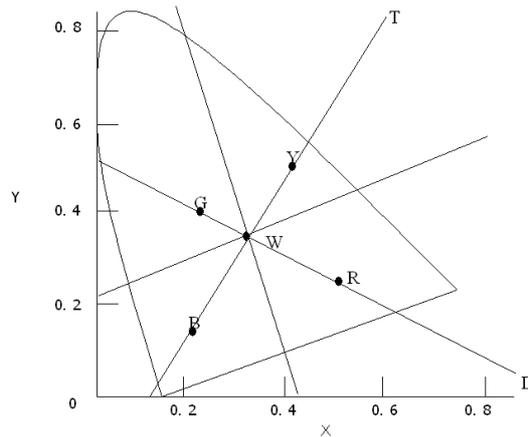


図 2.2 xy 色度図上での順応軸と順応色. D:D 軸, T:T 軸

2.2.1 順応条件 1(順応なし)

順応条件 1(No Adaptation) は, 比較のため色順応を行わない場合の色弁別についての実験である.

2.2.2 順応条件 2(定常刺激)

順応条件 2(定常刺激) は, 等輝度条件下 ($2000\text{cd}/\text{m}^2$) で, 順応色が R, G, B, Y の定常刺激による色順応である. 図 2.3 は順応条件 2 の順応刺激の時間と輝度の図である. 順応光の呈示中は $2000\text{cd}/\text{m}^2$ で一定である.

2.2 順応刺激

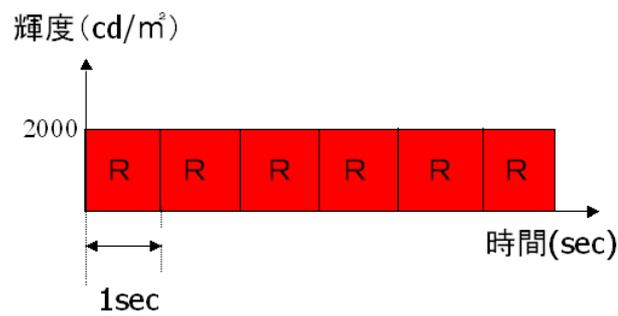


図 2.3 順応条件 2 の時間と輝度の図．順応光が R の場合．

2.2.3 順応条件 3(Square)

順応条件 3 (Square) は等輝度条件下 ($2000\text{cd}/\text{m}^2$) での等エネルギー白色と R, G, B, Y を等輝度で時間的矩形波の色交替刺激による色順応である．図 2.4 は順応条件 3 の順応刺激の時間的变化図である．

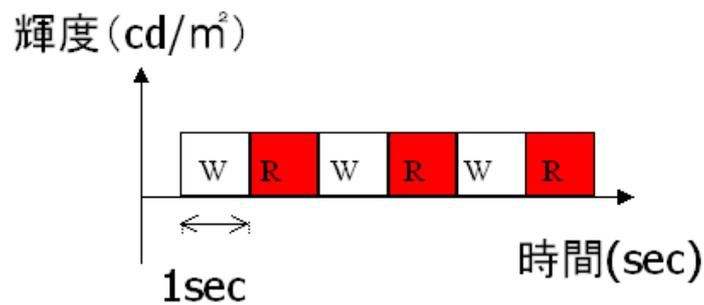


図 2.4 順応条件 3 の順応刺激の時間的变化図である．順応光が R の場合．

2.2.4 色順応時の右眼の見え方

図 2.5 は色順応時の右眼の見え方である．外枠はビームスプリッタであり，内枠の正方形が順応刺激である．

2.3 テスト刺激

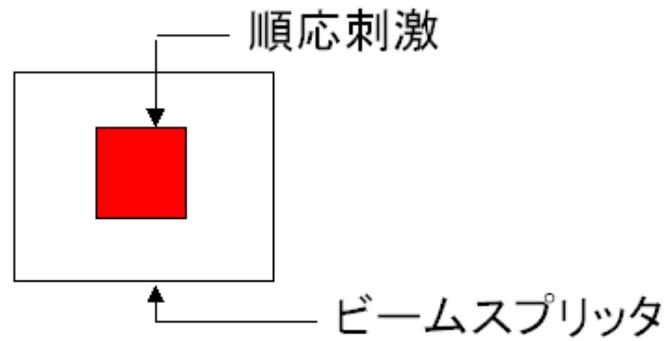


図 2.5 色順応時の右眼の見え方である。

2.3 テスト刺激

テスト刺激と背景の輝度は常に $10\text{cd}/\text{m}^2$ あり，呈示時間は 1 秒間である．図 2.6 は閾値でのテスト刺激の時間的变化図である．図 2.6 に示すように 500msec で立ち上がり 500msec で立ち下がる時間的サイン波状の色変化である．テスト刺激は背景と輝度で色度のみ変化する $\text{SD}2.63^\circ$ のガウス関数形状の円形である．

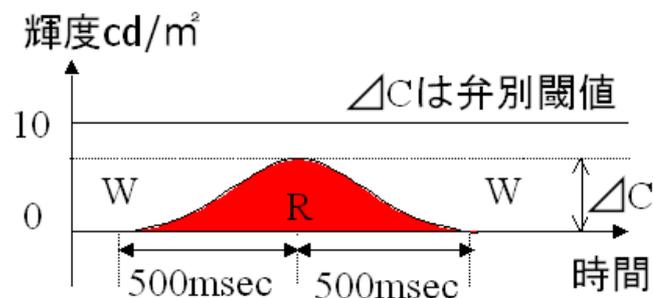


図 2.6 テスト刺激の時間的变化図。

テスト刺激の呈示場所は図 2.7 に示すように固視点を中心とした縦，横ともに視覚 2° 離れた 4 箇所の中の 1 箇所にランダムに呈示される．ディスプレイは縦が視覚 12° ，横が視覚 16° である．

図 2.8 は色弁別実験に用いたテスト方向の xy 色度座標図である．色弁別を行う方向は等エネルギー白色 (0.333,0.333) を中心として順応色 (錐体混同色線) として用いる 4 方向， $u'v'$ 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任意の 4 方向の

2.3 テスト刺激

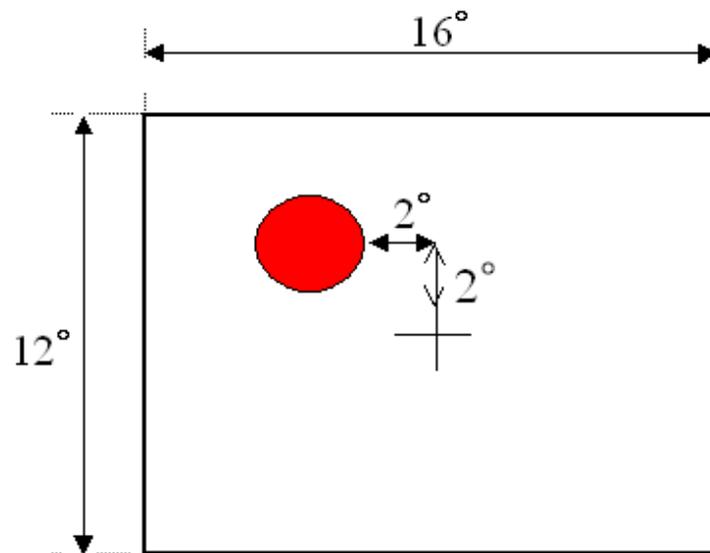


図 2.7 テスト刺激の呈示場所.

計 8 方向である．色弁別実験に用いたテスト方向の $u'v'$ 色度図上での座標は，錐体混同色線上である $R(0.478,0.261)$, $G(0.232,0.383)$, $B(0.230,0.116)$, $Y(0.415,0.474)$ と任意の $1(0.378,0.203)$, $2(0.542,0.405)$, $3(0.268,0.523)$, $4(0.209,0.290)$ である．

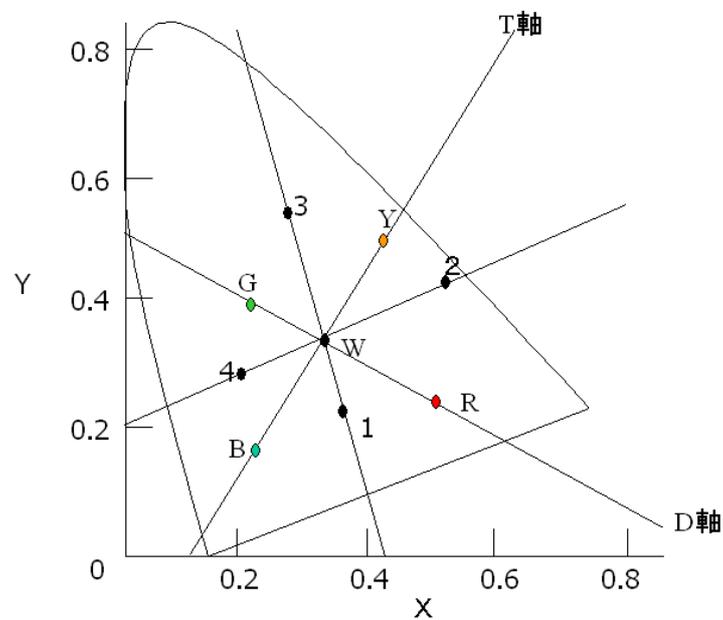


図 2.8 色弁別実験における色方向．

2.4 実験手順

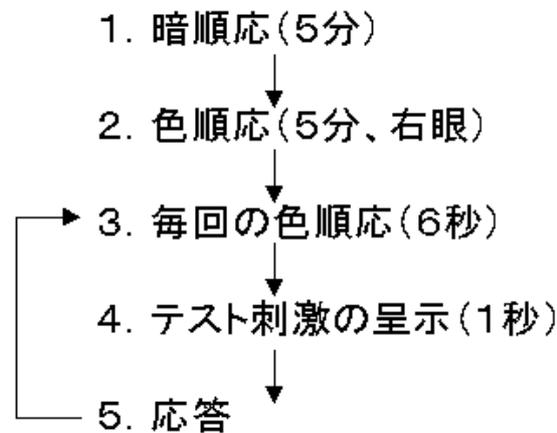


図 2.9 実験の流れ．図の矢印は実験の流れを示しており，5 から 3 への矢印は弁別閾値が求まるまで繰り返される．

図 2.9 は実験の流れである．初めに 5 分間の暗順応を行い，その後，順応条件 2，順応条件 3 の場合に色順応を 5 分間右眼に対し行う．その間，左眼はディスプレイを見ている状態（明順応）である．5 分間の暗順応，もしくは 5 分間の暗順応と 5 分間の色順応は実験の最初に 1 回だけ行われる．以上の順応後にピープ音が鳴り，被験者が手元のボタンを押すと図 2.9 の 3 番に進む．3 番ではテスト刺激の呈示の前に，毎回の順応として 6 秒間の色順応を行う．ただし，順応条件 1 に関しては，この毎回の色順応は行わない．順応刺激の呈示の終了後にピープ音が鳴り，それと同時にテスト刺激が呈示が開始される．テスト刺激の呈示が終了すると，再びピープ音が鳴りテスト刺激の呈示の終了を知らせる．そして，被験者にテスト刺激の呈示されたと思われる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 箇所の中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り答えてもらった．もし，被験者が 4 箇所の中のどこに呈示されたかわからない場合でも，4 つのボタンの内のいずれかを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．これをテスト方向を行う全ての色に対して弁別閾値が求まるまで繰り返した．また，被験者はこの実験中はディスプレイの中央にある固視点を固視してもらった．

2.4 実験手順

弁別閾値の決定 (6 回の方向変化) は two down-one up の階段法によるものである。被験者の応答が 2 回続けてテスト刺激の呈示場所と被験者の応答が同じ場合ではテスト刺激のステップを下げ、テスト刺激の呈示場所と被験者の応答が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 から 6 回目の方向変化点における値の平均値により色弁別閾値を決定した。

第 3 章

実験結果

被験者 M.K と T.S の順応条件 1 ~ 3 の色弁別実験結果図と被験者 M.H の順応条件 1 と順応条件 3 の順応色赤，緑の色弁別実験結果図を以下に示す．順応条件 1 に関しては，順応条件 2，3 の比較のために，いずれの結果図にも，同時にプロットした．実験回数は各色につき 4 回 (被験者 M.K の順応条件 1 のみ 8 回) であり，結果図のデータは平均結果をプロットしてある．しかし，被験者 M.K，M.H の順応条件 2 の順応光が緑と被験者 T.S の順応条件 2 の順応光が赤の場合は，実験結果として Out layer(データが大きく外れた測定点) が出ており，この 3 つの実験結果に関しては，Out layer を除く 3 回分の平均結果である．結果図は縦軸が u' ，横軸が v' であり，その他の結果図中の軸は各テスト刺激の軸方向であり，詳細は図 2.8 に記載した．また，結果図の順応ありの弁別閾値は，順応なしの弁別閾値との t - 検定 (分散が等しくないと仮定した 2 標本による検定) を試行しており，有意水準 5 % を満たした閾値の横に * で示してある．

3.1 順応条件 2

被験者 M.K は，順応光が黄以外の各順応光において色順応効果がみられた．しかし，閾値の上昇が軸に対して対称であるという結果は得られなかった．被験者 T.S では，各順応光において統計的有意差が得られない結果であった．また，各被験者により，色弁別閾値上昇の軸が順応方向とあっていない部分 (順応条件 3 も同様) もあるが，これは各被験者の色の軸が一般的な色の軸と必ずしも一致しないためであり，このことは結果には特に影響がないと考える．

3.1 順応条件 2

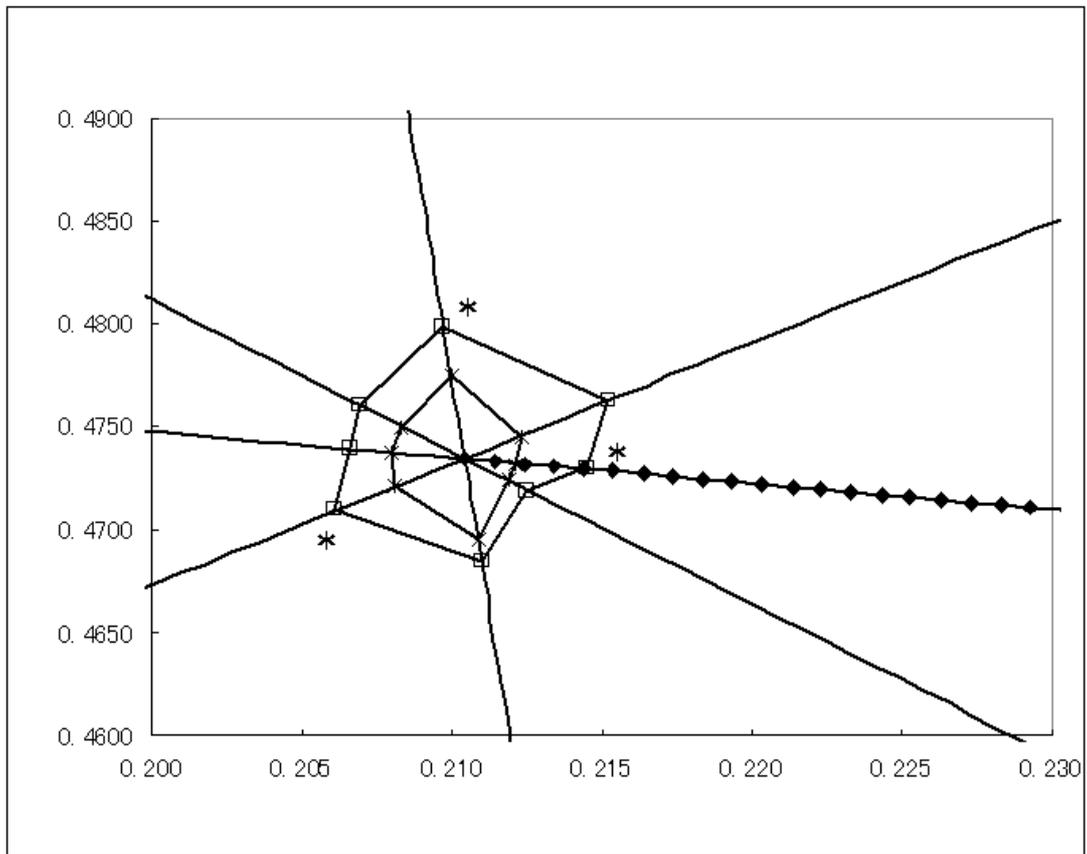


図 3.1 順応条件 2 の順応光が赤の被験者 M.K の実験結果 . 黒のひし形でプロットされた軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 赤の定常刺激の色弁別閾値の平均 *でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 *が隣にある弁別閾値 : 有意水準 5 % を満たした弁別閾値

3.1 順応条件 2

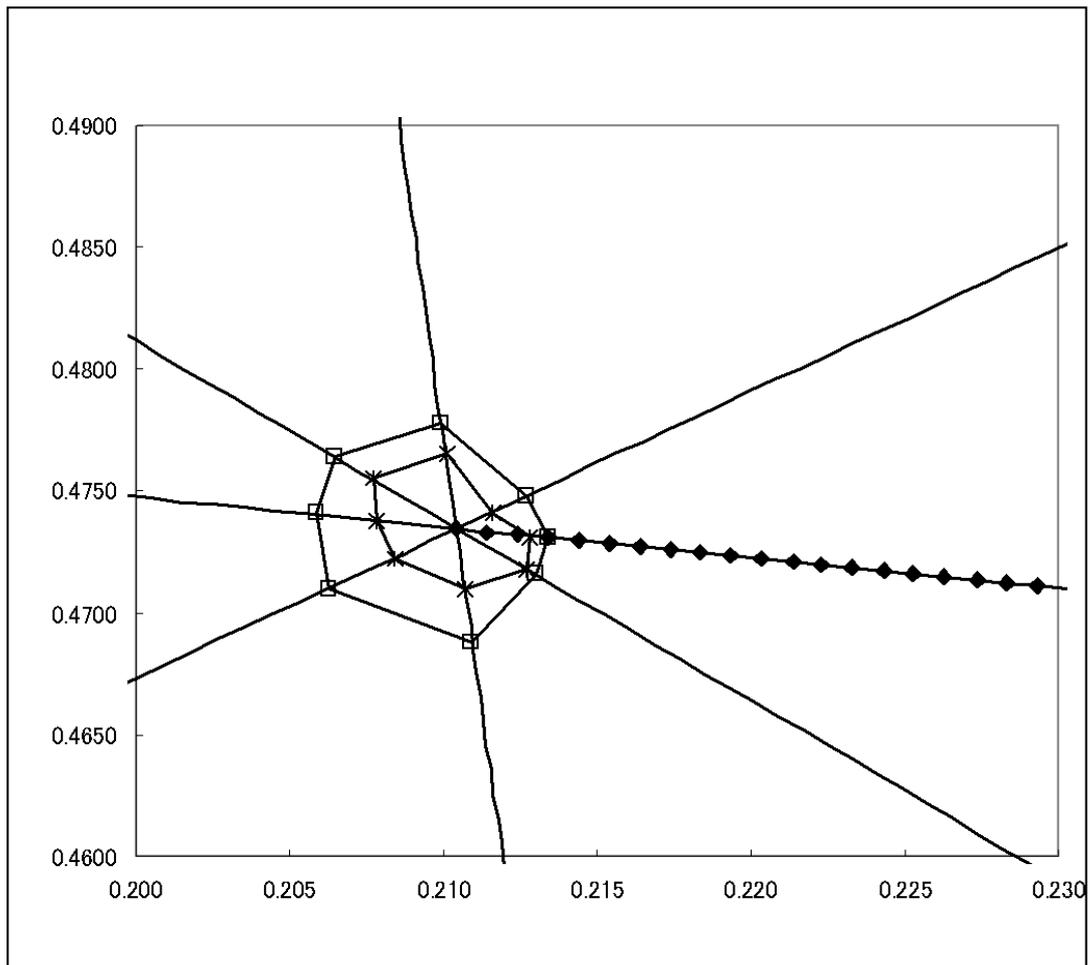


図 3.2 順応条件 2 の順応光が赤の被験者 T.S の実験結果 . 黒のひし形でプロットでされた軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 赤の定常刺激の色弁別閾値の平均 * * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均

3.1 順応条件 2

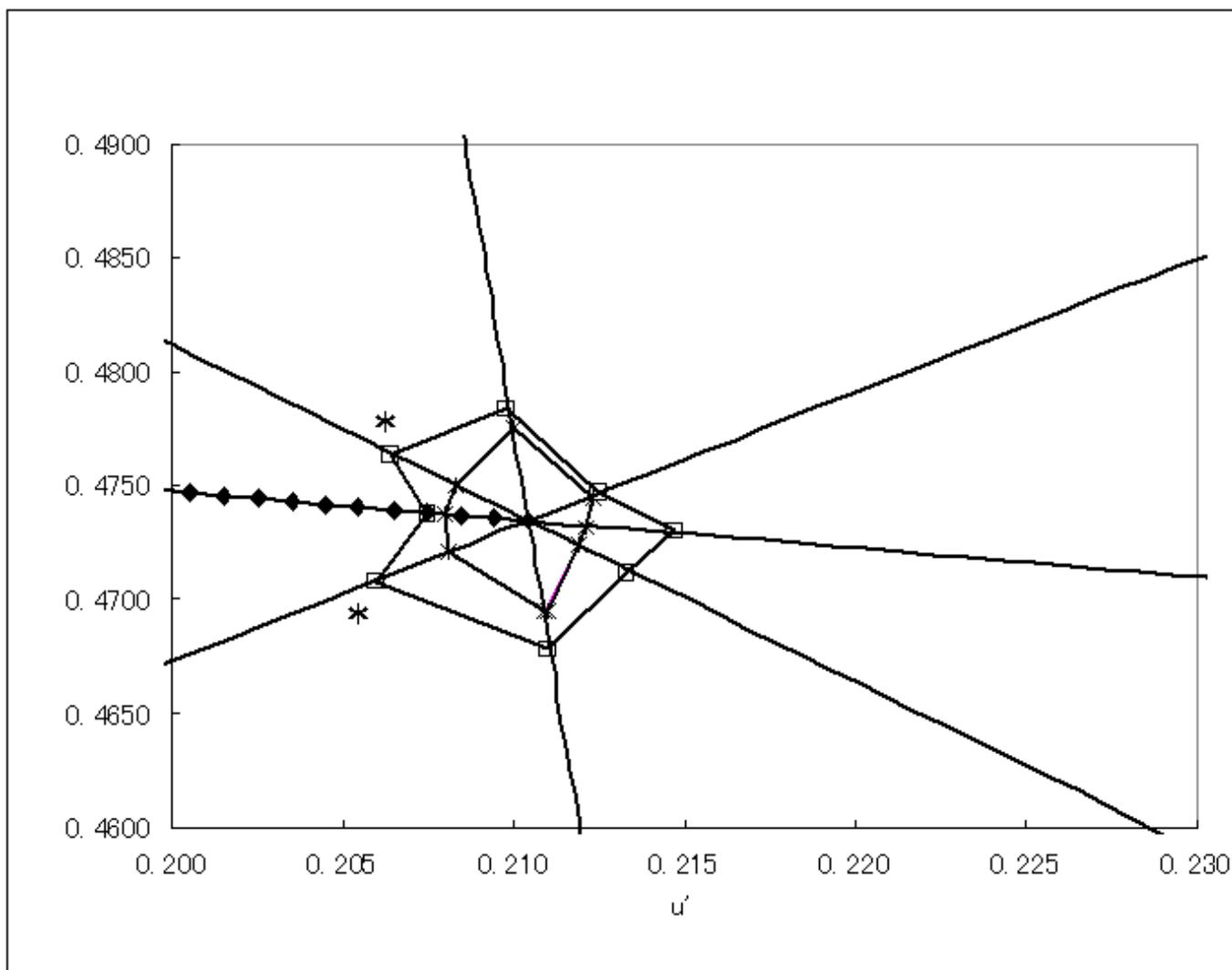


図 3.3 順応条件 2 の順応光が緑の被験者 M.K の実験結果図．黒のひし形でプロットされた軸は順応方向を示してある．
 ◻ でプロットされた結果図：緑の定常刺激の色弁別閾値の平均
 * でプロットされた結果図：順応刺激なしの色弁別閾値の平均
 * でプロットされた結果図：順応刺激なしの色弁別閾値の平均

3.1 順応条件 2

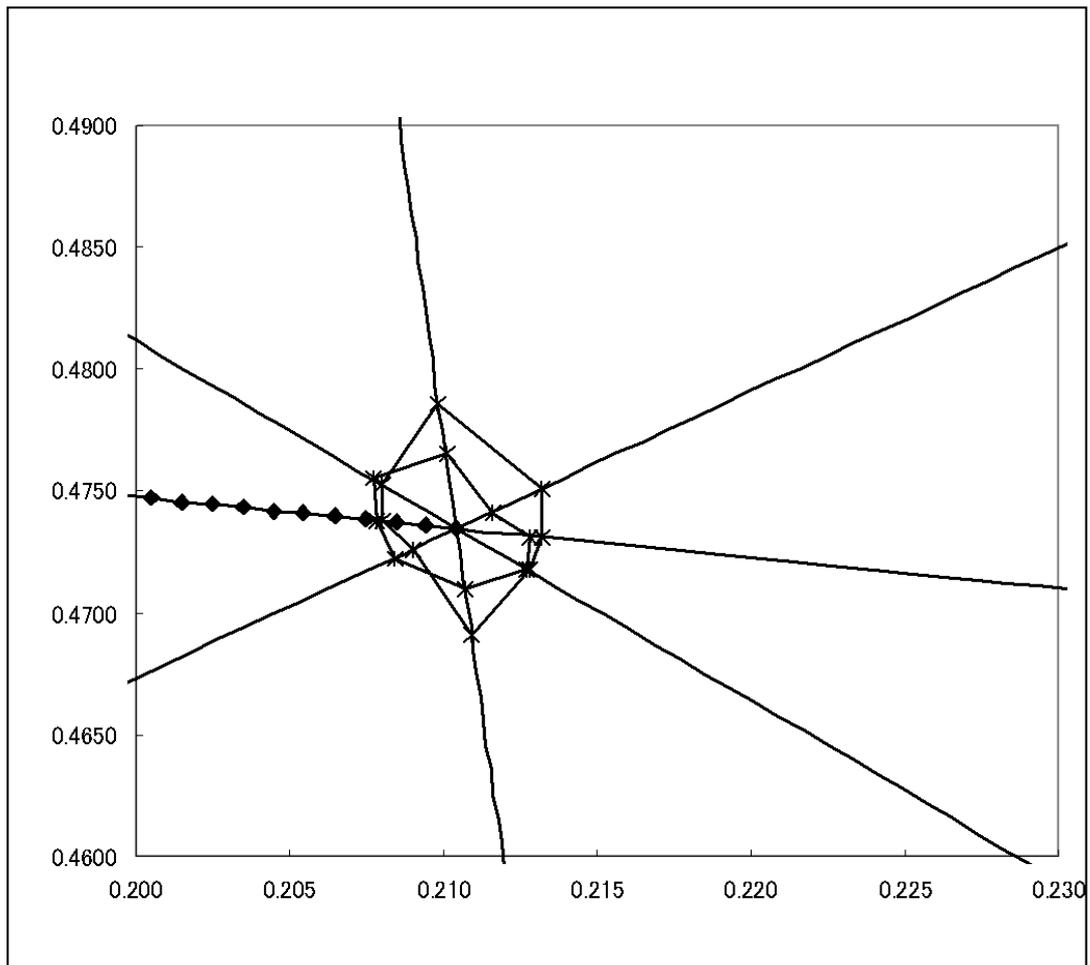


図 3.4 順応条件 2 の順応光が緑の被験者 T.S の実験結果 . 黒のひし形でプロットされた軸は順応方向を示してある . * でプロットされた結果図 : 緑の定常刺激の色弁別閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * が隣にある弁別閾値 : 有意水準 5 % を満たした弁別閾値

3.1 順応条件 2

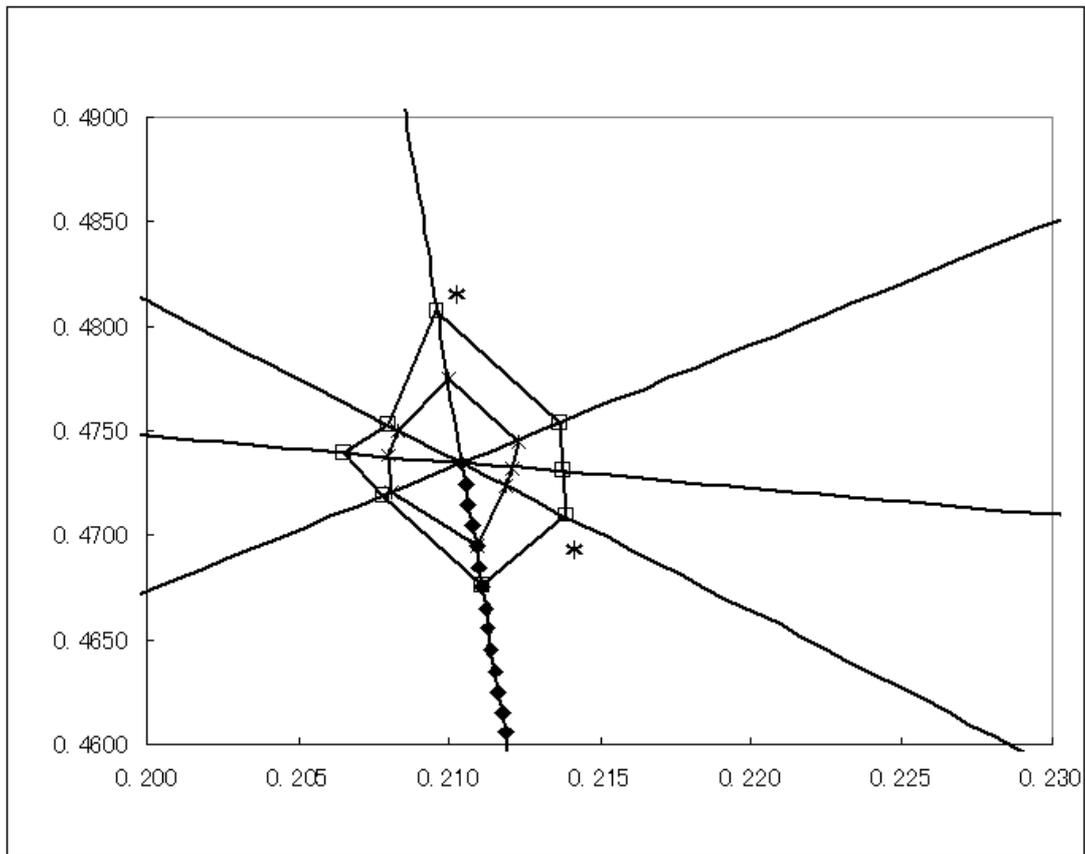


図 3.5 順応条件 2 の順応光が青の被験者 M.K の実験結果 . 黒のひし形でプロットされた軸は順応方向を示してある . □ でプロットされた結果図 : 青の定常刺激の色弁別閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均

3.1 順応条件 2

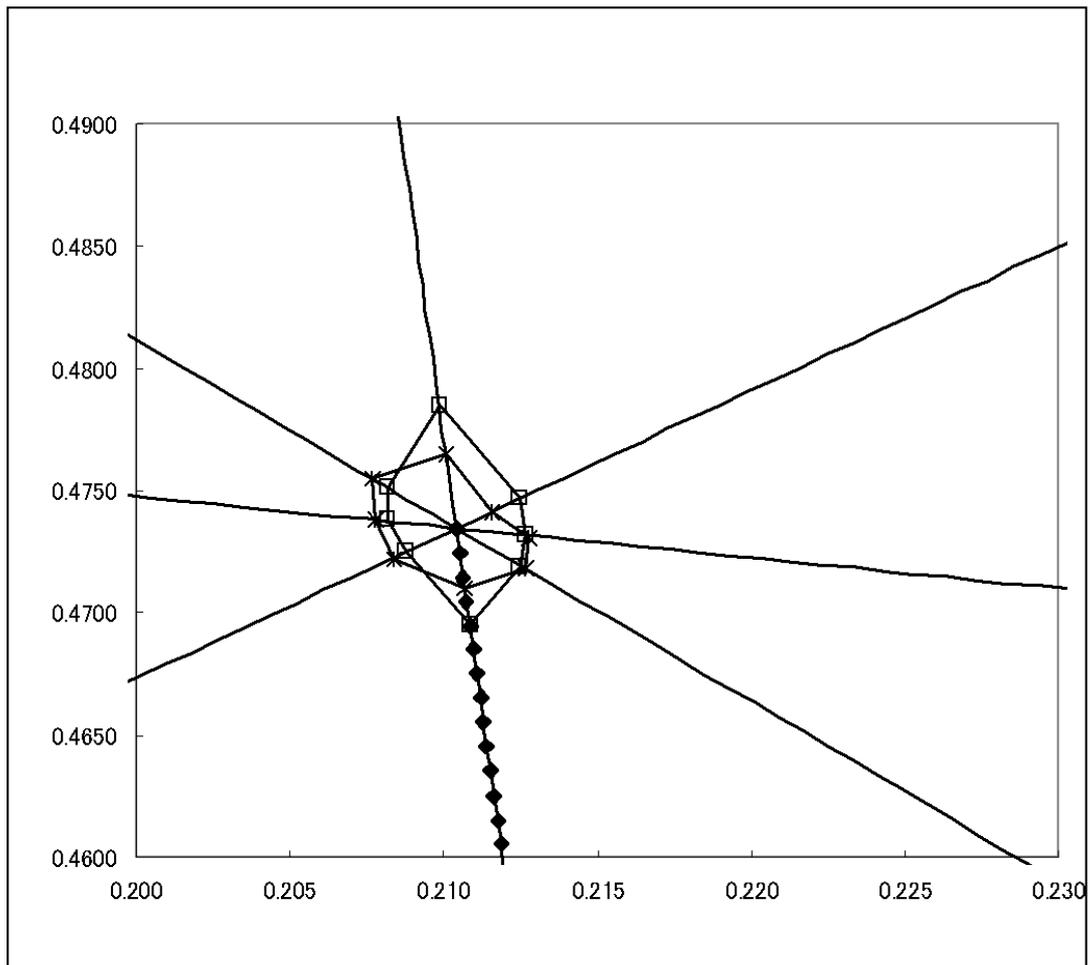


図 3.6 順応条件 2 の順応光が青の被験者 T.S の実験結果 . 黒のひし形でプロットされた軸は順応方向を示してある . 〇でプロットされた結果図 : 青の定常刺激の色弁別閾値の平均 *でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 *でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 *が隣にある弁別閾値 : 有意水準 5 %を満たした弁別閾値

3.1 順応条件 2

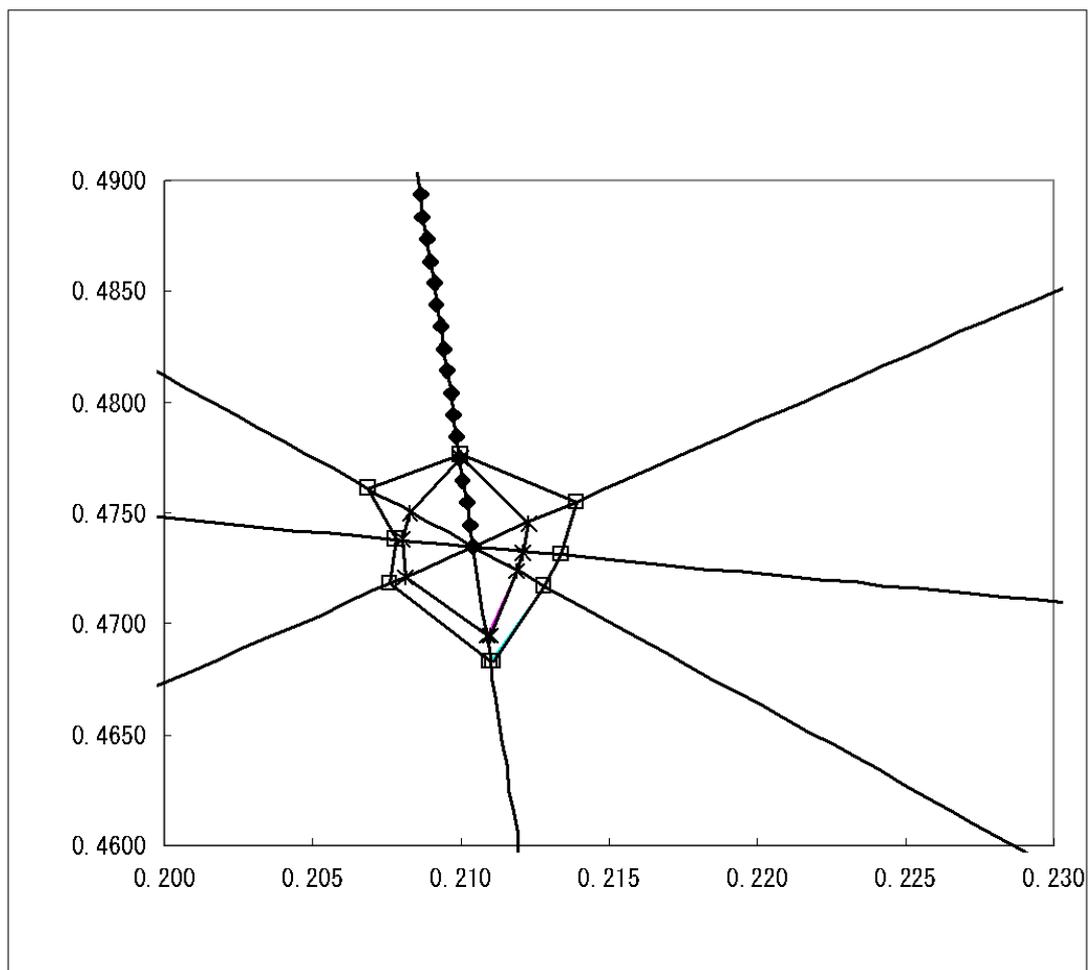


図 3.7 順応条件 2 の順応光が黄の被験者 M.K の実験結果．黒のひし形でプロットされた軸は順応方向を示してある．
 ○でプロットされた結果図：黄の定常刺激の色弁別閾値の平均
 *でプロットされた結果図：順応刺激なしの色弁別閾値の平均
 *でプロットされた結果図：順応刺激なしの色弁別閾値の平均
 *が隣にある弁別閾値：有意水準 5%を満たした弁別閾値

3.1 順応条件 2

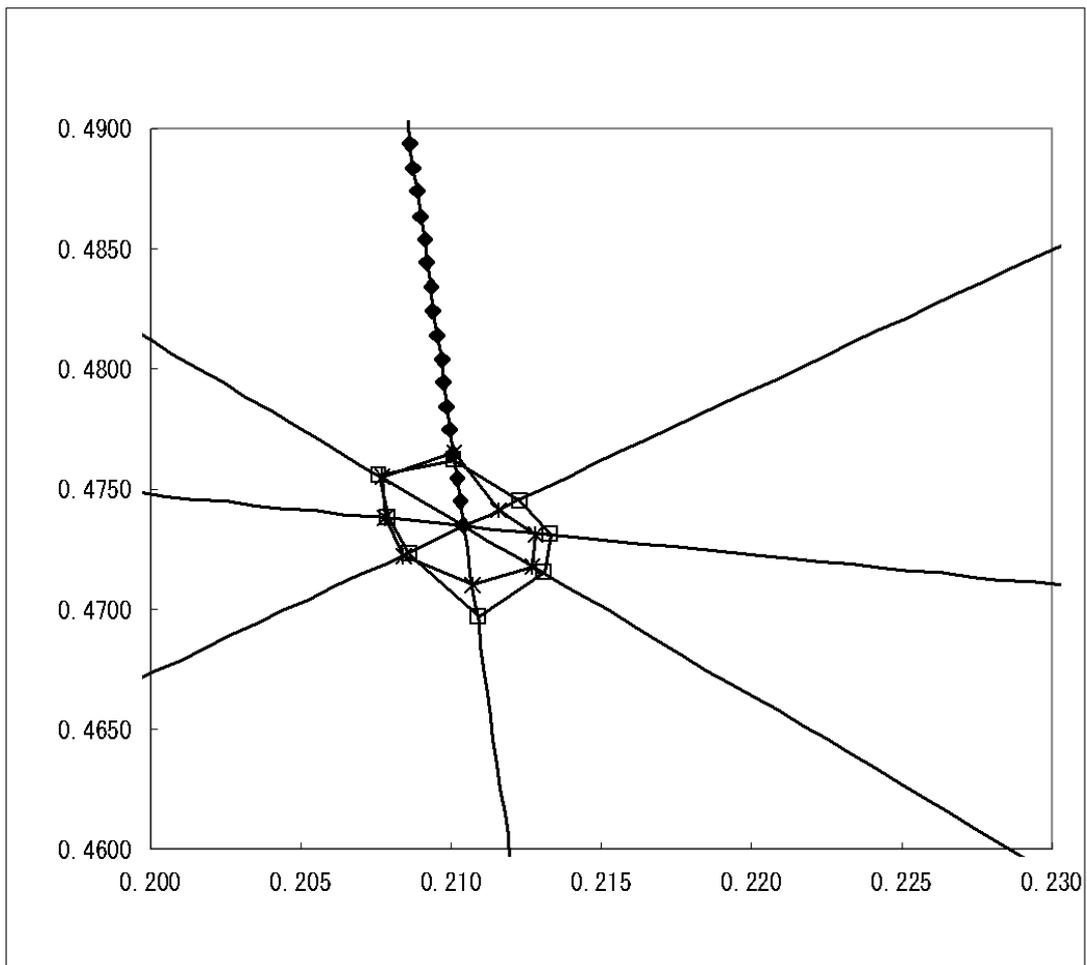


図 3.8 順応条件 2 の順応光が黄の被験者 T.S の実験結果 . 黒のひし形でプロットされた軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 黄の定常刺激の色弁別閾値の平均 *でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 *でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均

3.2 順応条件 3

3.2 順応条件 3

順応条件 2 の結果と同様に，被験者 M.K には，順応効果がみられ，順応色が赤，青の場合は各軸に対称な色弁別閾値の上昇が得られた．被験者 T.S は順応色が赤以外では順応効果があまりみられていない．被験者 M.H は実験結果が少ないため，今回の実験結果では順応効果がないといえる．また，その他の順応色に大しても各軸に対称な上昇がみられる結果となるだろう．

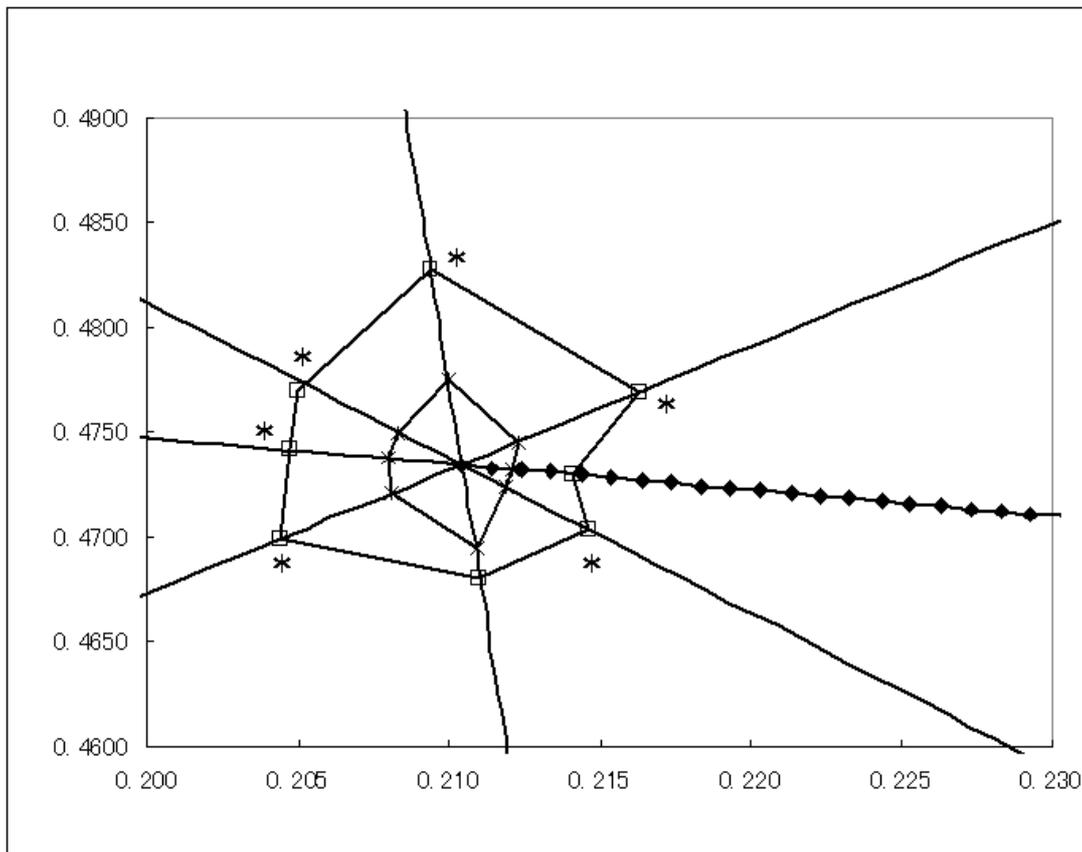


図 3.9 順応条件 3 の順応光が赤の被験者 M.K の実験結果．黒のひし形でプロットされた軸は順応方向を示してある．□：赤の Square の色弁別閾値の平均 *：順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * でプロットされた結果図：順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * が隣にある弁別閾値：有意水準 5 % を満たした弁別閾値

3.2 順応条件 3

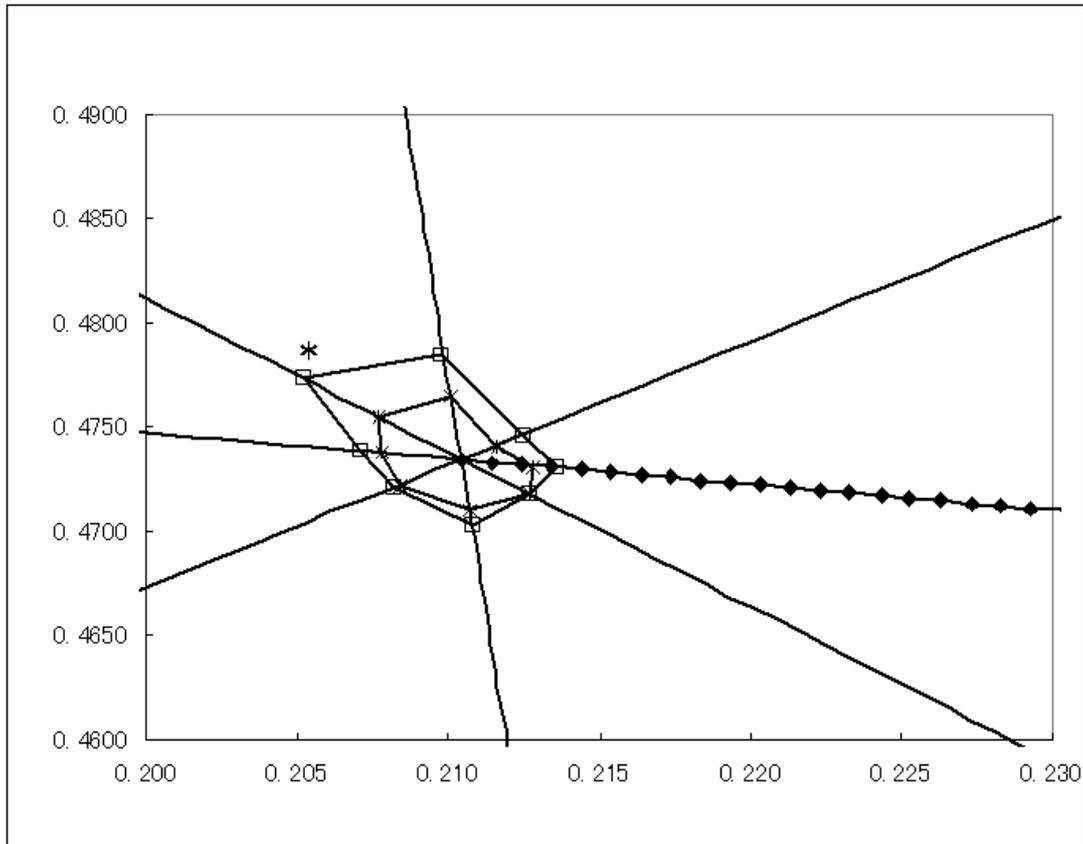


図 3.10 順応条件 3 の順応光が赤の被験者 T.S の実験結果図 . 黒のひし形でプロット
 でされた軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 赤の Square の色弁
 別閾値の平均 *でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 *が隣
 にある弁別閾値 : 有意水準 5 % を満たした弁別閾値

3.2 順応条件 3

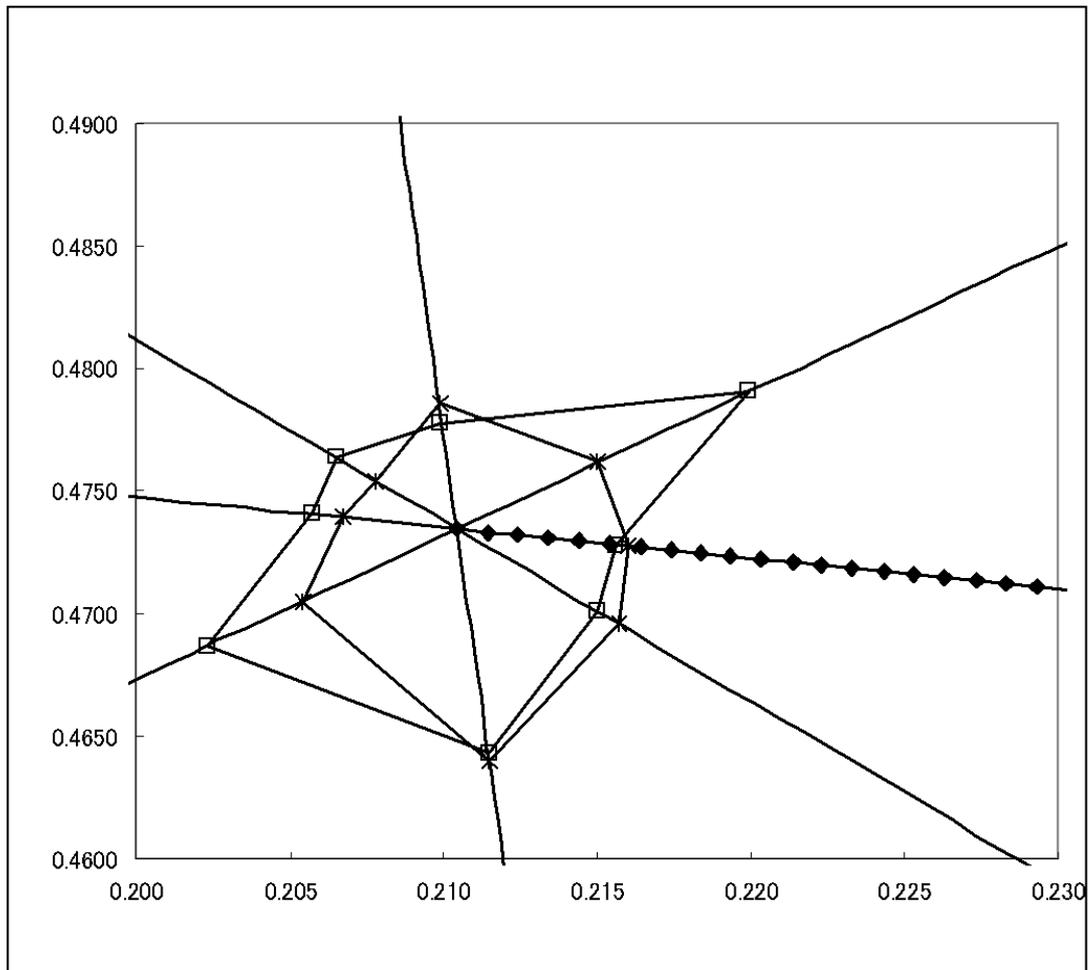


図 3.11 順応条件 3 の順応光が赤の被験者 M.H の実験結果 . 黒のひし形でプロットで
 された軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 赤の Square の色弁別
 閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均

3.2 順応条件 3

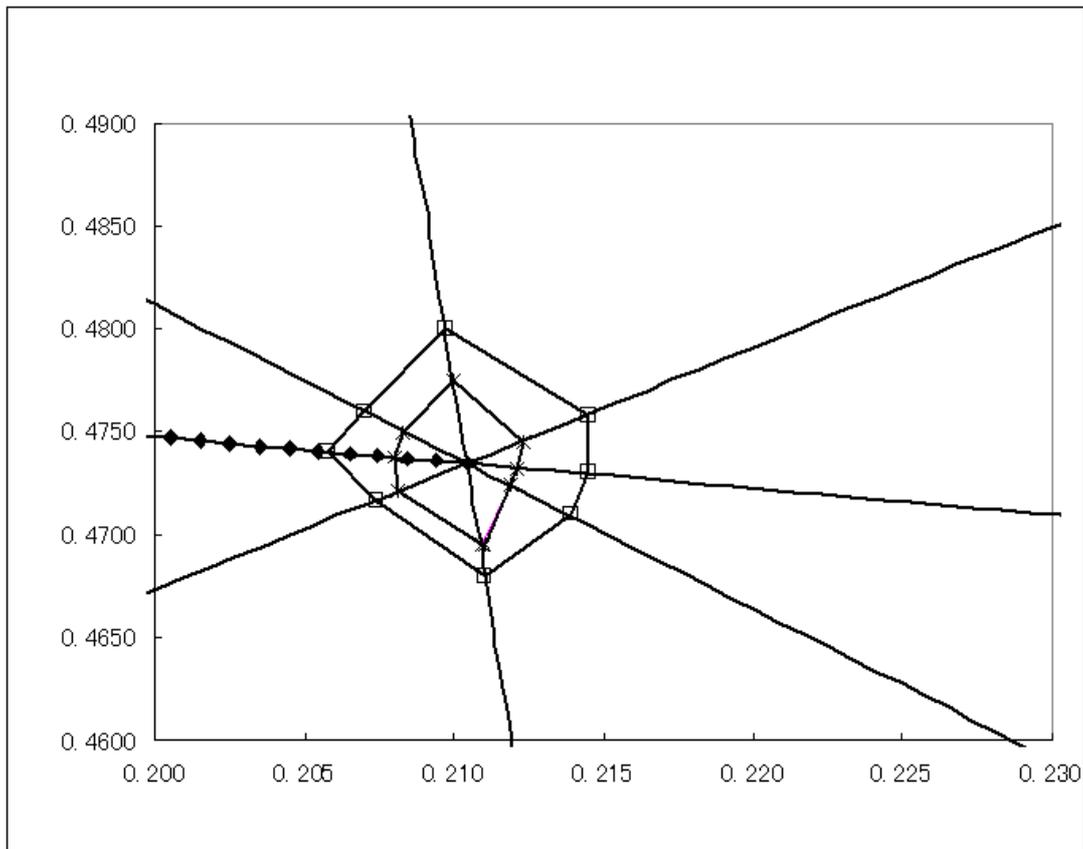


図 3.12 順応条件 3 の順応光が緑の被験者 M.K の実験結果 . 黒のひし形でプロット
 でされた軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 緑の Square の色弁
 別閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * でプ
 ロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * が隣にある弁別閾値 : 有意
 水準 5 % を満たした弁別閾値

3.2 順応条件 3

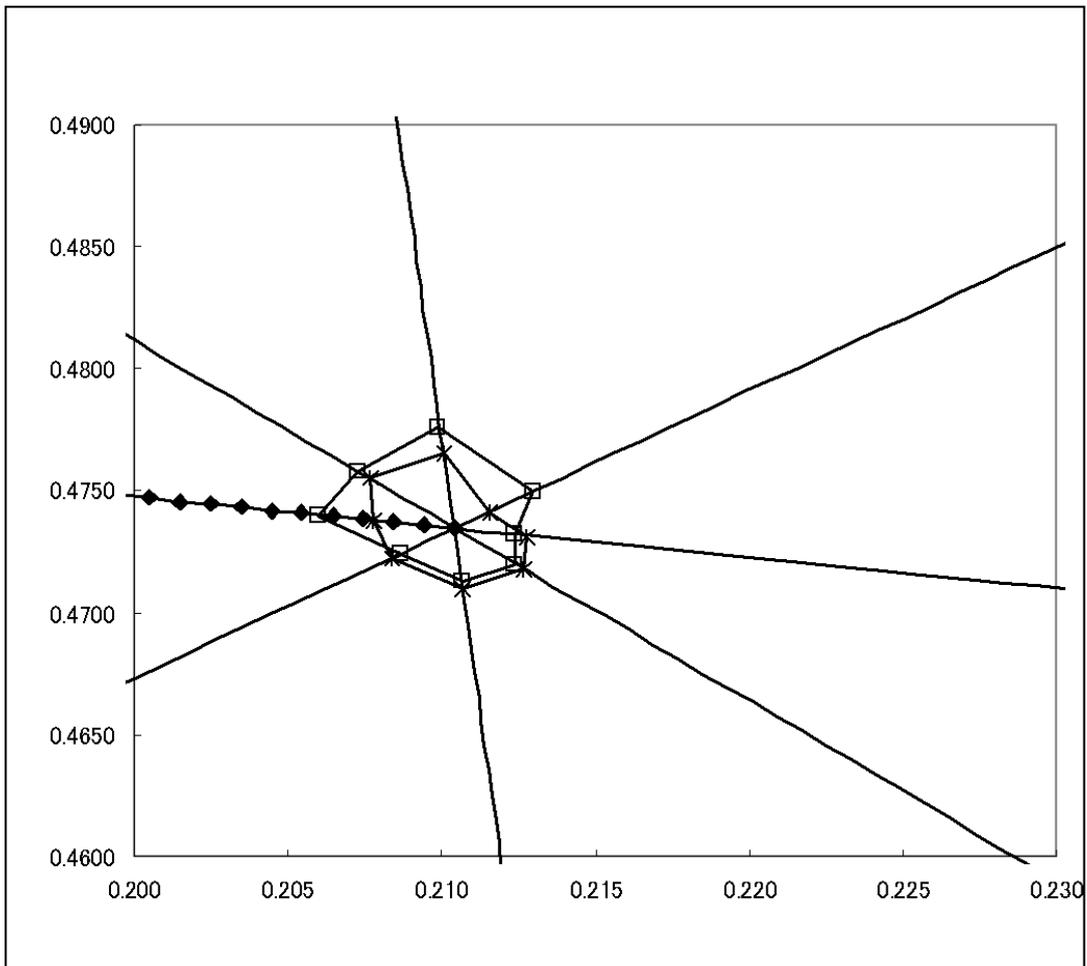


図 3.13 順応条件 3 の順応光が緑の被験者 T.S の実験結果 . 黒のひし形でプロットで
 された軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 緑の Square の色弁別
 閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均

3.2 順応条件 3

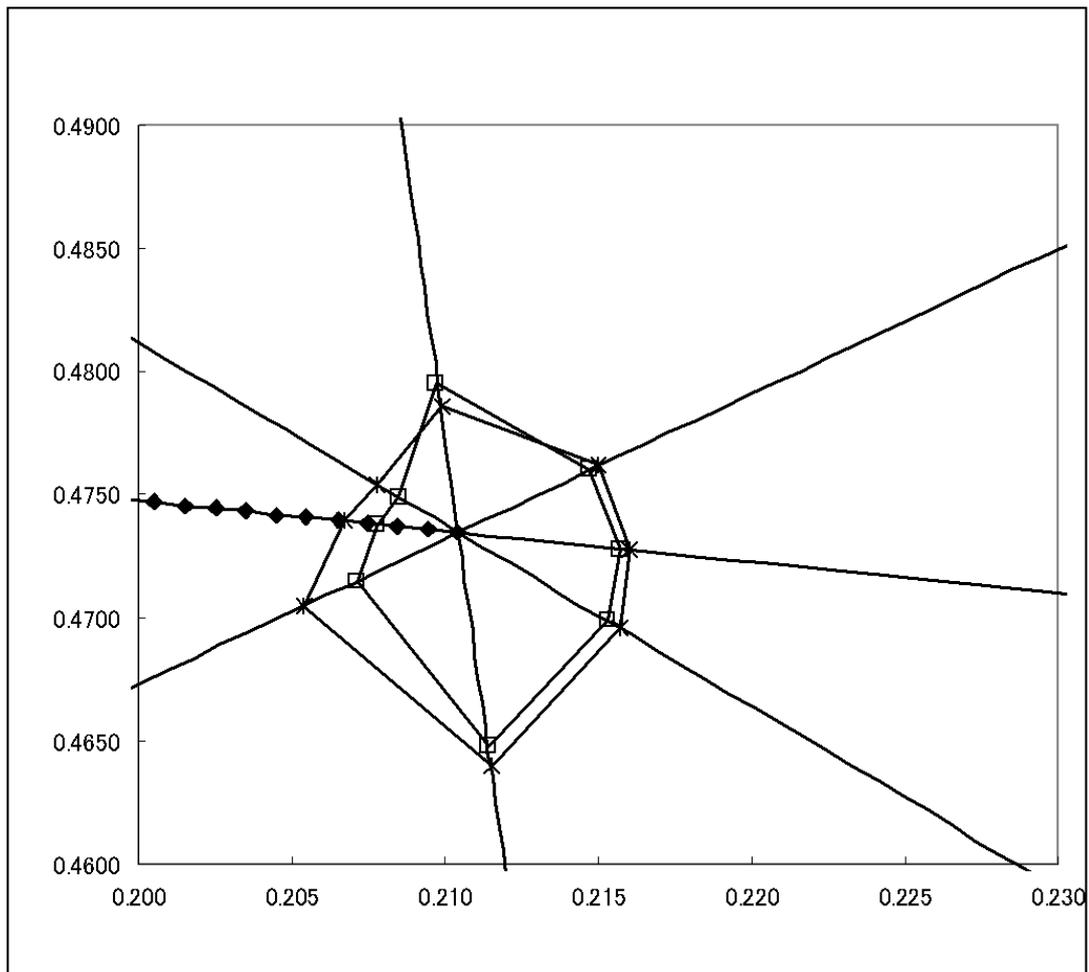


図 3.14 順応条件 3 の順応光が緑の被験者 M.H の実験結果 . 黒のひし形でプロットでされた軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 緑の Square の色弁別閾値の平均 *でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均

3.2 順応条件 3

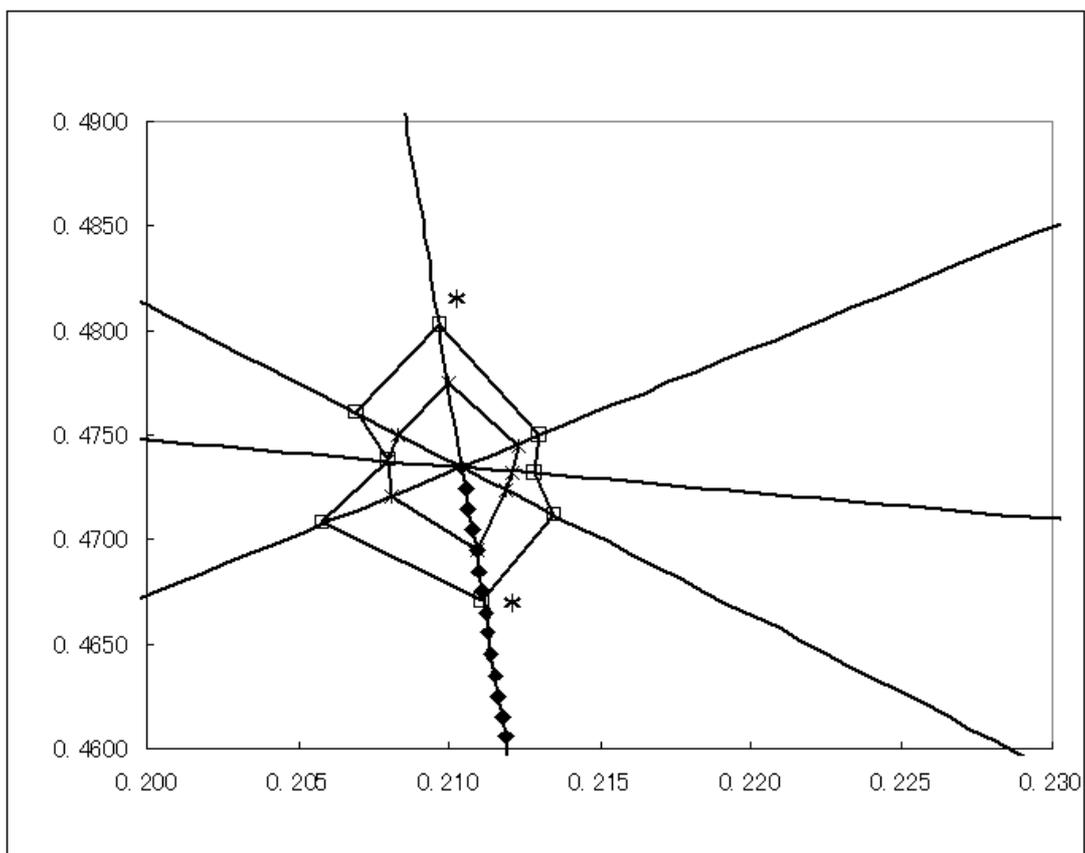


図 3.15 順応条件 3 の順応光が青の被験者 M.K の実験結果 . 黒のひし形でプロット
 でされた軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 青の Square の色弁
 別閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * でプ
 ロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * が隣にある弁別閾値 : 有意
 水準 5 % を満たした弁別閾値

3.2 順応条件 3

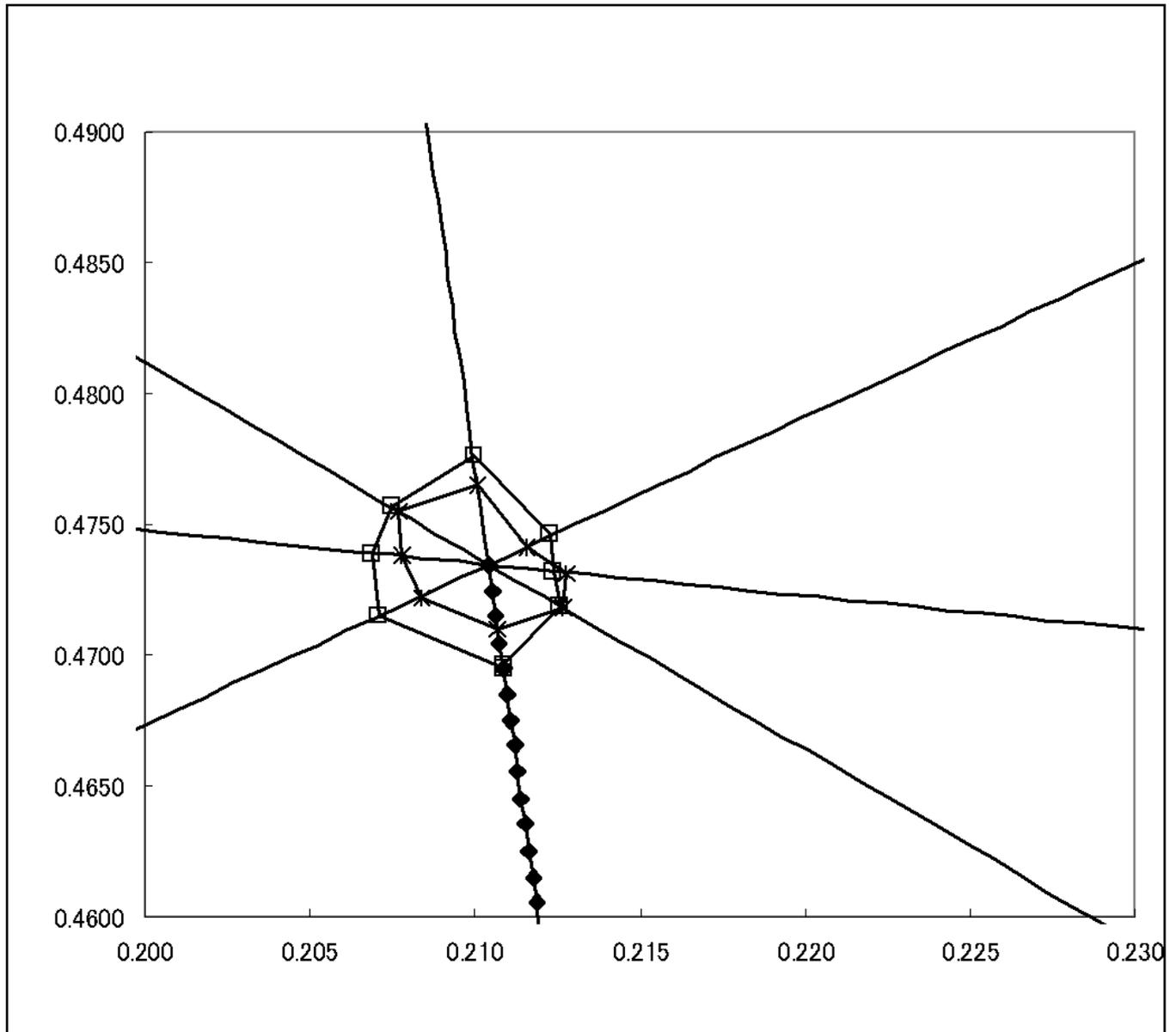


図 3.16 順応条件 3 の順応光が青の被験者 T.S の実験結果図 . 黒のひし形でプロット
 でされた軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 青の Square の色弁
 別閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均

3.2 順応条件 3

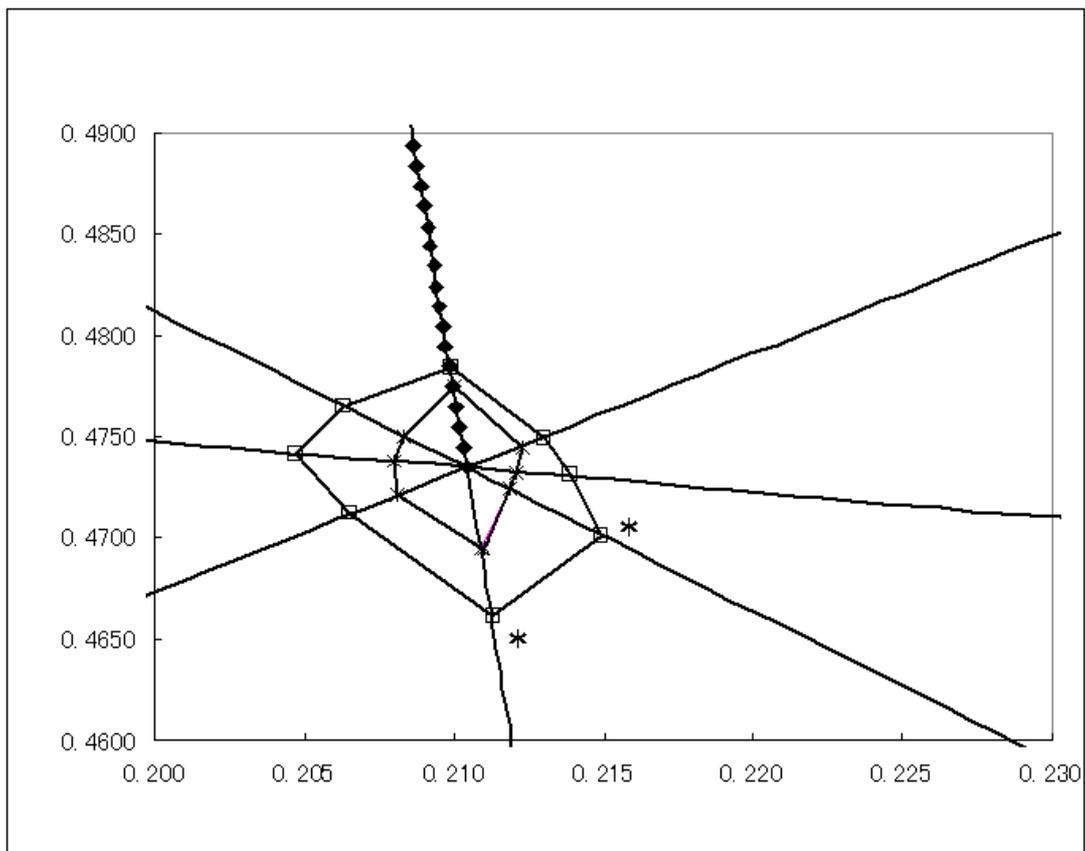


図 3.17 順応条件 3 の順応光が黄の被験者 M.K の実験結果 . 黒のひし形でプロット
 でされた軸は順応方向を示してある . でプロットされた結果図 : 黄の Square の色弁
 別閾値の平均 *でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均

3.2 順応条件 3

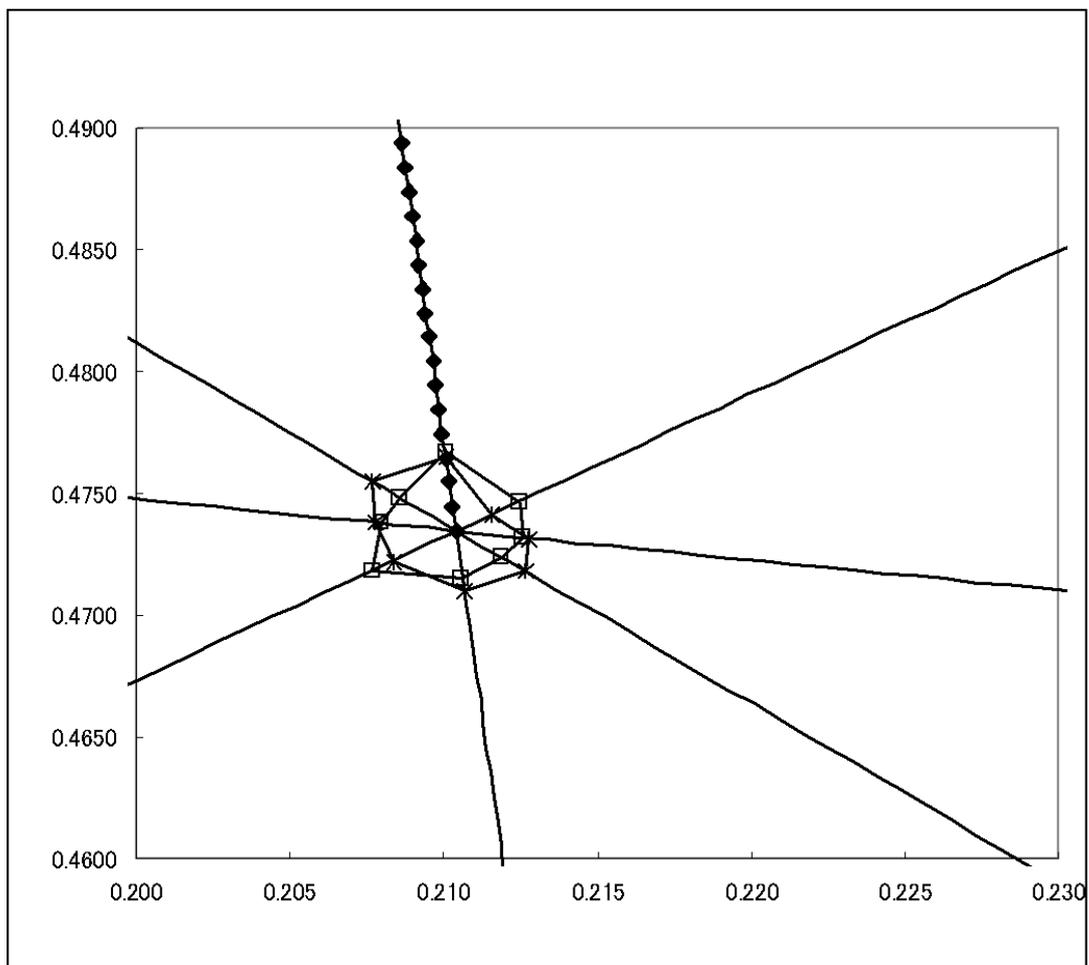


図 3.18 順応条件 3 の順応光が黄の被験者 T.S の実験結果 . 黒のひし形でプロットされた軸は順応方向を示してある . \square でプロットされた結果図 : 黄の Square の色弁別閾値の平均 \times でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 \triangle でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 \square が隣にある弁別閾値 : 有意水準 5% を満たした弁別閾値

第 4 章

考察とまとめ

4.1 他眼への色順応後の色弁別に対する影響

まず，今回の実験結果は t-検定による統計的有意差を調べている．以下は t-検定をまとめた表である．表の赤，緑，青，黄は，その順応色において，有意差が認められた弁別閾値の数である．

- 順応条件 2

被験者	赤	緑	青	黄
M.K	3	2	2	0
T.S	0	0	0	0
M.H	-	-	-	-

- 順応条件 3

被験者	赤	緑	青	黄
M.K	6	1	2	2
T.S	1	0	0	0
M.H	0	0	-	-

このように統計的有意差を調べた結果，条件別には順応条件 3 が，順応色別には順応色の赤で，より多くの軸に対し色弁別閾値上昇がみられる結果となった．順応色が緑の場合に関しては，今回の実験に採用した緑が他の赤や青に比べて彩度が低かったため十分な閾値上昇のレベルまで達しなかったのではないかと考える．また，被験者別では M.K の場合は順

4.1 他眼への色順応後の色弁別に対する影響

応効果がみられ、他の2者に関しては、ほとんどみられない結果となった。つまり、被験者 M.K に関しては、いくつかの順応条件によって他眼に対して順応を与えた場合でも、色弁別閾値は上昇する結果であった。そこで、被験者 M.K の順応条件2、3の順応色が赤の結果を比較する。

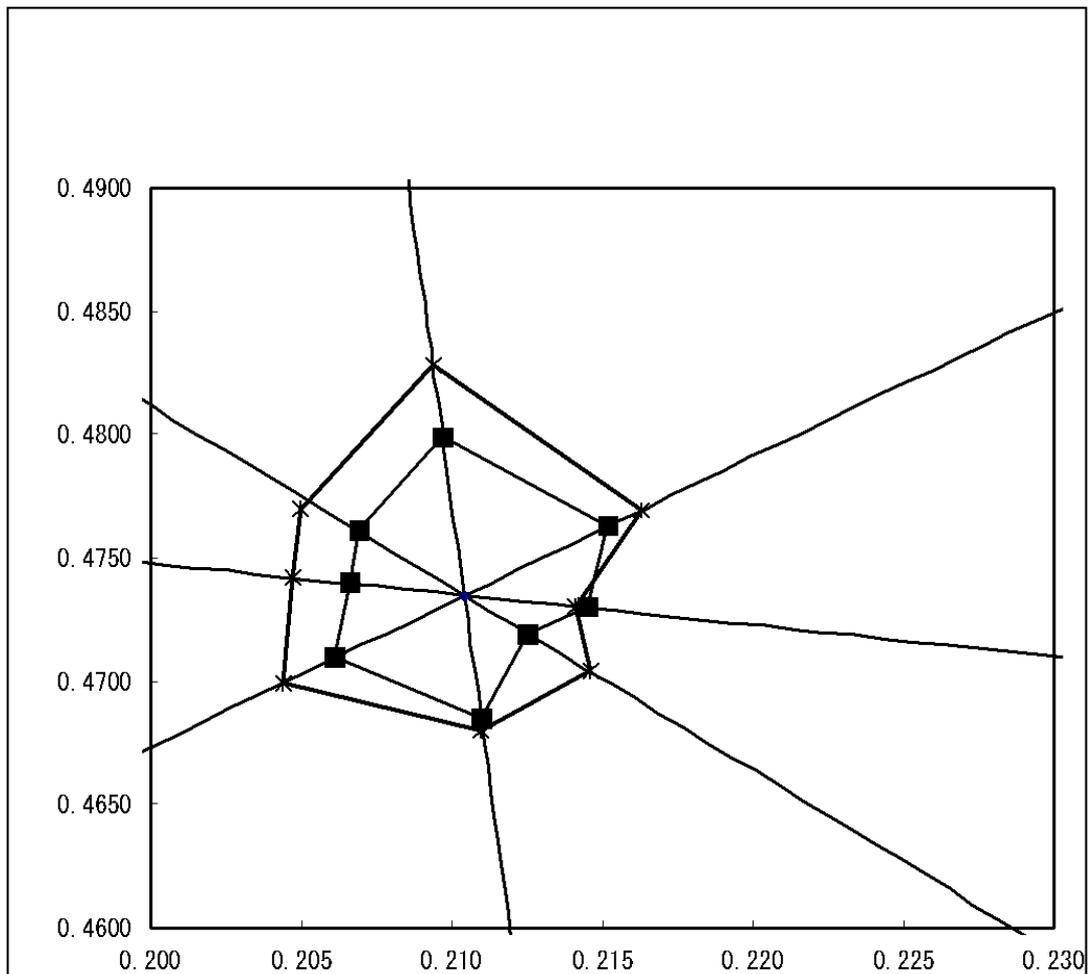


図 4.1 被験者 M.K の赤の実験結果。 □ でプロットされた結果図：順応条件2 * でプロットされた結果図：順応条件3

t-検定の結果と同様、図を比較すると順応条件3の方が順応効果が多くみられる。これは、今回の実験対象部位である外側膝状体以降など、順応レベルが高次レベルへと高くなるにしてがって、時間的作用のある刺激(例えば、色交替刺激)に対し、選択的順応効果が強いことから、このような結果になったと考えられる。つまり、定常刺激は錐体レベルでの順

4.2 反対色チャンネルの2色の独立性について

応が強く、外側膝状体以降に影響を及ぼす可能性が低い。同一眼での色弁別実験を行った前回の実験でも、同一眼（錐体レベルを含む色順応効果）では定常刺激の方が、色交替刺激に比べ順応効果が強かったと報告されている。よって、他眼への順応の場合、その順応効果は外側膝状体以降の色覚メカニズムに対する順応のみが起きていると考えられ、外側膝状体以降の色チャンネル経路のみを、錐体や網膜神経回路への順応と分離して順応する事が今回の手法で可能である。

4.2 反対色チャンネルの2色の独立性について

まず、被験者 T.S に関しては、順応条件3の順応色が赤の場合は色順応効果がテスト刺激8方向のうち1方向にだけ統計的有意差がみられたが、その他の各順応条件、各順応色で統計的有意差は得られていない。また、被験者 M.H に関しても、実験回数が少ないが、被験者 T.S と同様に統計的有意差を得られていない。被験者 M.H に関しては、各順応条件、各順応色に対し実験を行えば、おそらく被験者 T.S と類似な結果を示すと予測している。そこで、順応効果が得られた被験者 M.K に関して、実験結果を検討する。色順応光の色方向を表す軸上のどちらの色方向へも対称な色弁別閾値の上昇が得られた結果として、順応条件3の赤、青がある。

順応光が赤の結果（図 4.2）は、順応方向には統計的有意差が得られず反対方向に統計的有意差が得られているが、その他の統計的有意差が得られた軸をみると解るように、各軸に対しほぼ対象である。また、順応光が青の結果（図 4.3）は、順応方向とその反対方向に統計的有意差が得られ、各軸に対称な色弁別閾値の上昇がみられる。その他の結果図に関しては、各軸に対して対照的な色弁別閾値上昇が得られていないが、多少の軸のずれがあるが、反対色チャンネルを示唆する程の結果でないことも考慮し、ある程度対象であると考え。もし、反対色チャンネルが独立していたのならば、反対色の片方の色（例えば、赤-緑ならば赤）で順応して場合に、その色方向のみに色弁別閾値の上昇がみられる。しかし、今回はそのような実験結果は得られなかった。この原因は、例えば、赤の刺激が呈示されている時に

4.2 反対色チャンネルの2色の独立性について

応答を止め、呈示がなくな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。これは、順応刺激が白から赤へ色交替して赤の呈示の時は応答せず、逆の赤から白へ色交替する応答するというようなオフ応答を意味する。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、白と赤の色交替刺激で順応した場合でも、緑方向への閾値上昇がみられるという可能性がある。これは、他の赤、青、黄にも同様なことが考えられる。また、Krauskopf や Webster らのように、赤-緑、青-黄の反対色チャンネルが対になっているから、どちらか一方のチャンネルが刺激されると、対の片方も刺激されるという考えや、テスト刺激の立ち上がり、立下りで反対色チャンネルの赤-緑青-黄の両方を刺激しているという可能性も考えられる。このように、今回の実験結果からは同一眼への色順応後の色弁別実験の結果と同様に、他眼に対して色順応を与えた場合でも、反対色チャンネルの独立性を示唆する結果は得られなかった。つまり、比較的高次である外側膝状体以降の色チャンネル経路においても、反対色チャンネルの2色の独立性は、今回の色順応の手法では示されなかった。

4.2 反対色チャンネルの2色の独立性について

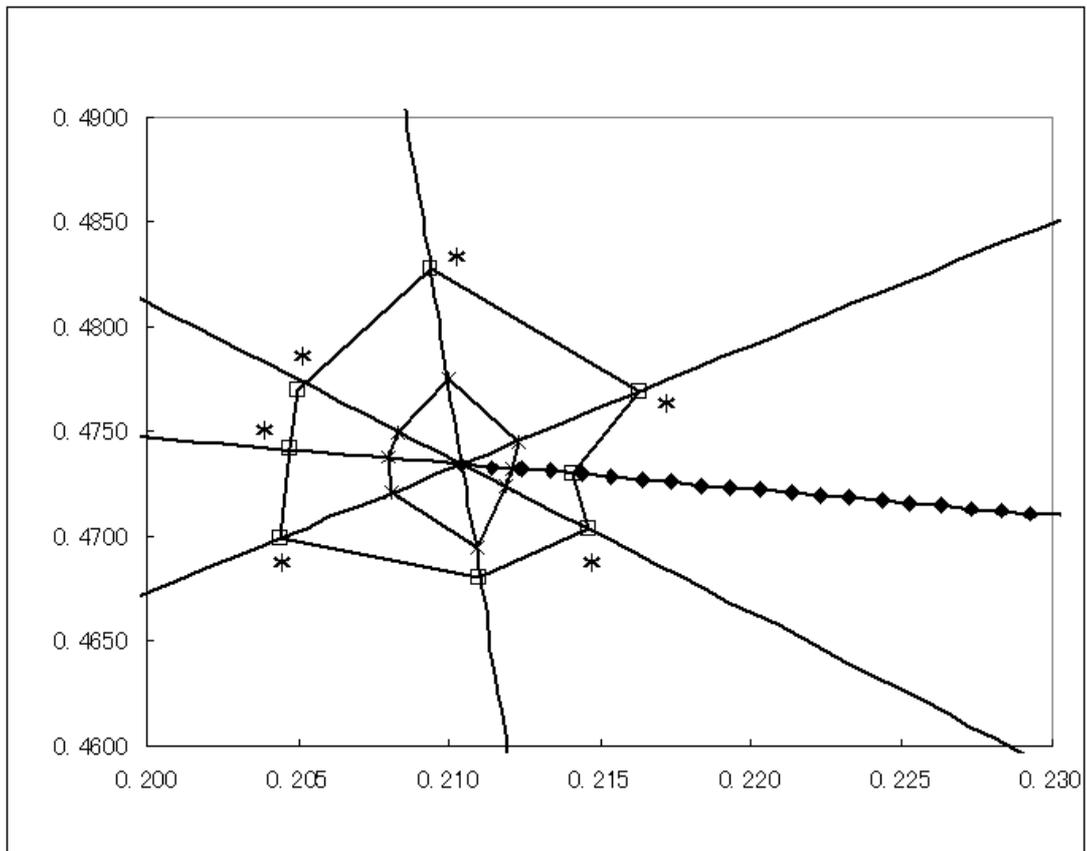


図 4.2 順応光が赤の被験者 M.K の実験結果．黒のひし形でプロットでされた軸は順応方向を示してある． □ : 赤の Square の色弁別閾値の平均 * : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * が隣にある弁別閾値 : 有意水準 5 % を満たした弁別閾値

4.2 反対色チャンネルの2色の独立性について

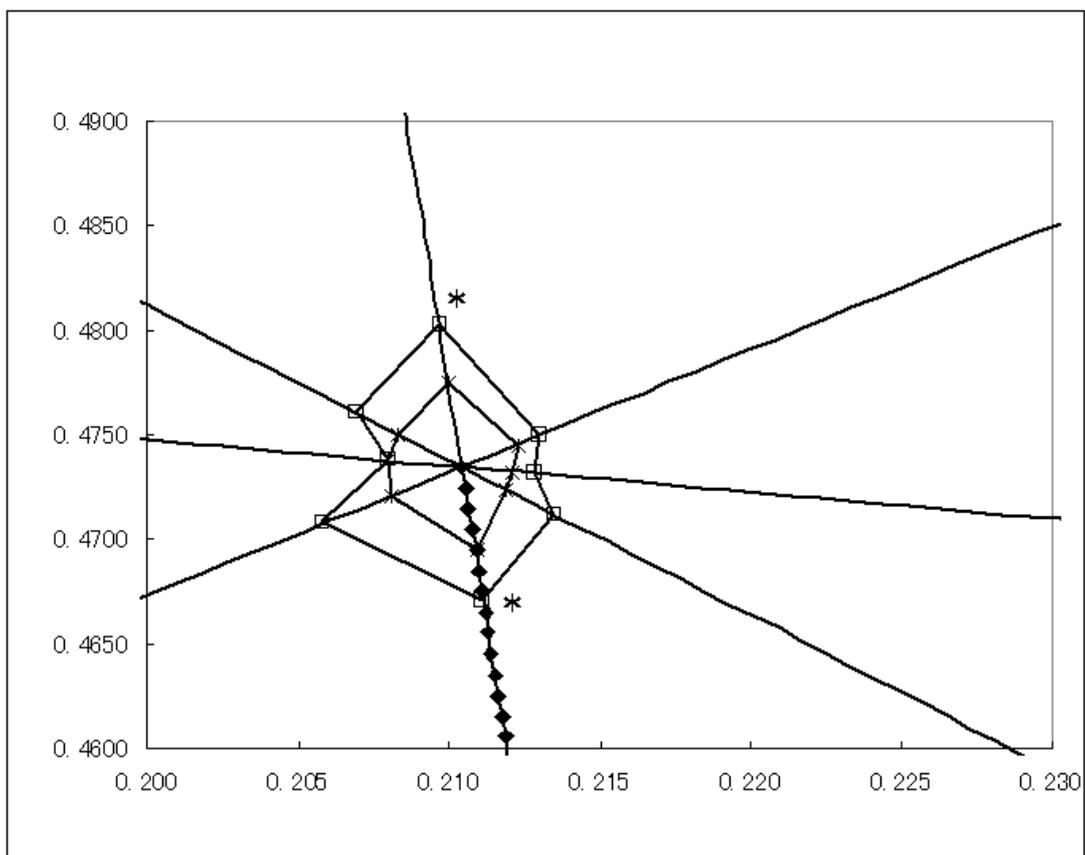


図 4.3 順応光が青の被験者 M.K の実験結果 . 黒のひし形でプロットされた軸は順応方向を示してある . □ でプロットされた結果図 : 青の Square の色弁別閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * でプロットされた結果図 : 順応刺激なしの色弁別閾値の平均 * が隣にある弁別閾値 : 有意水準 5 % を満たした弁別閾値

4.3 被験者間の相違について

被験者によって順応が出ている場合と出ていない場合の2タイプがあった。被験者 T.S では上記の t-検定の表から解るように，テスト刺激の方向が 8 方向，順応色が 4 色，順応刺激のある順応条件が 2 種類だから被験者 M.K, T.S に関しては，7 4 箇所の色弁別閾値について t-検定を行ったことになる。その内，被験者 M.K では 1 8 箇所，被験者 T.S では 1 箇所の統計的有意差が得られた。つまり，外側膝状体以降に色順応効果がみられない被験者 T.S がいたということなのだが，このような被験者には錐体や網膜レベルでの順応はあるのだろうか。そこで，被験者 T.S に関して，追加実験で左眼の色順応下での左眼の色弁別実験により，錐体レベルを含んだ色順応効果を調べた。追加実験のテスト刺激は，錐体レベルの順応効果があると予測できたため 4 方向で行った。結果は，どの色方向へも他の被験者と同じレベルの対称な弁別閾値の上昇が得られた。つまり，外側膝状体以降にあまりみられなかった色順応効果は，錐体レベルでは確認できたことから，被験者 M.K と T.S の差は，外側膝状体以降の色チャンネル経路に対する順応効果の違いによると考えられる。

第 5 章

今後の課題

今回の実験結果からは，反対色チャンネルの 2 色（例えば，赤と緑）の独立性を示唆する結果は得られなかった．この理由として，今回の実験で採用したような急激な色交替刺激では，例えば，白から赤への急激な色交替の時には，赤の時間的 on チャンネルを順応するのみならず，緑の時間的 off チャンネルを順応する可能性もあって選択的色順応ではないかもしれない可能性がある．そこで，白色と今回の実験で採用した赤，緑，青，黄を時間的鋸状波変化する順応刺激（図 4.4）に変えて実験を行う必要がある．この順応刺激は，例えば，白から赤に変化する場合は赤の時間的 on チャンネルを選択的に強く順応していると考えられる．

また， $2000\text{cd}/\text{m}^2$ の白色との比較が必要である．今回の順応刺激は全て $2000\text{cd}/\text{m}^2$ の等輝度刺激であり，呈上刺激として，今回の実験で採用した 4 色に加え， $2000\text{cd}/\text{m}^2$ の白色の定常刺激がどのように外側膝上体以降に影響を及ぼすか必要がある．この件に関しては，2002 年の日本視覚学会，冬季大会において指摘されたことである．いずれの件についても，早急に調べる必要がある．



図 5.1 鋸状波変化する順応刺激．白から赤，赤から白へ緩やかな変化をする順応刺激

謝辞

この実験に被験者として参加して下さった平山正治様，下山孝士様，日本視覚学会 2002 年冬季大会おきまして様々な御助言を頂いた先生方，この実験に対する実験装置を御借りし，本実験の御指導を頂いた深田良尚様，そして，本実験について 1 から御指導を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ております．この場を御借りして，御礼を申し上げます．

参考文献

外側膝状体以降における色順応効果，梶原誠，深田良尚，篠森敬三，日本視覚学会誌 [VISION]，Vol.14，No.1，pp51，2002

前刺激による色順応後の色弁別，深田良尚，篠森敬三，日本視覚学会誌 [VISION]，Vol.13，No.1，pp70，2001

「色覚のメカニズム」，内川恵二，朝倉書店，1998

「視覚情報処理ハンドブック」，日本視覚学会編，朝倉書店，2000

「視覚の心理物理学」，池田光男，森北出版，1975