

平成 14 年度
学士学位論文

CRT ディスプレイにおいて異なる 錐体順応の条件での色恒常性

Color Constancy in the Conditions of Different Cone
Adaptation in a CRT Display

1030281 谷口 沙織

指導教員 篠森 敬三

2003 年 2 月 12 日

高知工科大学 情報システム工学科

要 旨

CRT ディスプレイにおいて異なる 錐体順応の条件での色恒常性

谷口 沙織

先行研究 [1] で、照明空間を持たない刺激呈示方法として異なる色温度をもつ CRT ディスプレイ上の画像を比較した場合での色恒常性について検証した。その結果、CRT の色温度の違いだけでも十分良好な色恒常性が見られ、結果は von Kries 型錐体順応モデルで説明可能であった。ただし、この様な照明空間を持たない刺激条件下で、現実には錐体順応の効果がどれだけ色恒常性に寄与しているかは明確でない。そこで、錐体順応レベルが異なると考えられる実験条件で、色恒常性の強さがどのように変化するかを調べることを目的に実験を行った。

暗室内に 1 台の PC に接続された CRT を 2 つ設置し、左の CRT の色温度を 9300K、右の CRT を 6500K (基準) に設定して同じ画像を呈示した。画像内の色票上に人工的操作で任意の基準色を作り、左の CRT の色票が右の CRT の色票 (基準色) と同じに紙になったと思うまで、左の色票の色 (9300K 上) を色相、彩度、明度の全てで調整してもらった。

被験者 3 人の結果を x, y 色度座標上でプロットし考察したところ、ある一定の色恒常性が見られた。そして、S, L-2M 錐体で錐体応答量をだし、プロットしなおしたところ、 x, y でプロットしたときと同様の結果が得られた。また、この結果は、錐体順応を表す von Kries 型順応式で説明可能であった。しかし、S 錐体と L-2M 錐体で直線近似を出し、考察したところ、色恒常性の強さは実験条件から考えられる錐体順応レベルとは一致しないことが分かった。よって、錐体順応のみの結果で色恒常性が起こっているものではなく、より高次での作用が寄与しているのではないかという結果が得られた。[2]

キーワード 色恒常性, 錐体順応, von Kries

Abstract

Color Constancy in the Conditions of Different Cone Adaptation in a CRT Display

Saori TANIGUCHI

In a previous research[1], color constancy was verified when picture of on two CRT displays with two different color temperatures as the presentation methods were compared. As the result, there were color constancy only with difference of color temperature of CRT, and the result was able to explain by von Kries type cone adaptation model. However, it is not clear whether the effect of cone adaptation contribute to color constancy on stimulus conditions without lighting space. Then, the experiment was conducted for a purpose that investigate how the strength of color constancy changed on the experiment conditions considered that cone adaptation levels differ.

Two CRT displays connected to one set of PC in a darkroom. Left CRT was set as 9300K and right CRT was set as 6500K (standard), and the same picture was displayed. Arbitrary standard colors are made from artificial operation on color matching paper in a picture. Until color matching paper of left CRT thinks that it became paper similarly to color matching paper of right CRT(standard color), the color of left color matching paper(on 9300K) adjusted by hue, saturation, and brightness.

The constant color constancy was seen, when I plotted results of three subjects on the x,y chromaticity coordinates and considered. Then I calculated the amount of cone responses on the basis of S,L-2M cone, and replotted. The results were the same as the first plotting data. Still more, the results were able to explain by von Kries type cone

adaptation model that showed cone adaptation. But, I became clear that strength of color constancy disagree with cone adaptation levels when calculated by S,L-2M cone and considered.

key words color constancy, cone adaptaion, von Kries

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	色覚メカニズム	2
1.3	色恒常性について	3
1.4	従来の色恒常性	4
1.4.1	実験手法	4
1.4.2	結果とその傾向	6
1.5	研究内容	6
1.5.1	先行研究 [1]	6
1.5.2	本研究の目的	7
第 2 章	実験	8
2.1	実験条件	8
2.2	実験装置	9
2.3	被験者	10
2.4	刺激	10
2.5	実験手順	11
第 3 章	実験結果	13
3.1	実験 1 両眼自由視条件	14
3.2	実験 2 Haploscopic 呈示条件	15
3.3	実験 3 シャッターによる短時間呈示条件	16
第 4 章	考察	17
4.1	考察 1	17

4.1.1	錐体分光感度	17
4.1.2	実験1 両眼自由視条件	19
4.1.3	実験2 Haploscopic 呈示条件	20
4.1.4	実験3 シャッターによる短時間呈示条件	21
4.1.5	考察1のまとめ	21
4.2	考察2 - von Kries 型順応式	23
4.3	Sにおける近似直線	25
4.3.1	実験1 両眼自由視条件	25
4.3.2	実験2 Haploscopic 呈示条件	26
4.3.3	実験3 シャッターによる短時間呈示条件	27
4.3.4	錐体応答量の関係	28
4.4	L-2Mにおける近似直線	29
4.4.1	実験1 両眼自由視条件	29
4.4.2	実験2 Haploscopic 呈示条件	30
4.4.3	実験3 シャッターによる短時間呈示条件	31
4.4.4	錐体応答量の関係	32
4.5	考察2のまとめ	33
4.5.1	ディスプレイの色温度	33
4.5.2	錐体順応量が変化すると考えられる3つの刺激呈示条件による影響	33
	L, M, S 錐体	33
	S 錐体応答の場合	33
	L-2M 錐体応答の場合	34
	刺激呈示条件と色恒常性の強さ	34
第5章	結論	36
	謝辞	37

参考文献	38
付録 A 色覚検査について	39
A.1 色覚検査表	39
A.2 パネル D-15 テスト	39

目次

1.1	錐体からの出力	2
1.2	照明光の変化	3
1.3	非対称マッチングの方法	5
2.1	暗室内の概略図	9
2.2	実験刺激	11
3.1	実験1 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)	14
3.2	実験2 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)	15
3.3	実験3 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)	16
4.1	実験1 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)	19
4.2	実験2 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)	20
4.3	実験3 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)	21
4.4	実験1 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下) の近似直線	25
4.5	実験2 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下) 近似直線	26
4.6	実験3 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下) の近似直線	27
4.7	実験1 (上), 実験2 (真ん中), 実験3 (下)	28
4.8	実験1 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下) の近似直線	29
4.9	実験2 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下) の近似直線	30
4.10	実験3 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下) の近似直線	31
4.11	実験1 (上), 実験2 (真ん中), 実験3 (下)	32

第 1 章

はじめに

1.1 背景

情報技術の発達により動画像を撮影する装置が一般に普及している．動画像撮影では撮影者自身が照明光の異なる環境の中を移動したり，撮影中に照明光が変化するなどの照明空間の動的な変化が含まれる．この時，カメラの撮影パラメータが固定であると，再生時にあたかも撮影対象の色が変化したように見える事態が生じる．

この現象は，人間とカメラとで照明空間の扱いに違いがあるからである．カメラの場合，あらかじめホワイトバランスを設定しておくことにより，物体からの反射光と照明光を計算し，色を記録する．一方人間の場合は，照明光と物体の分光反射率を分離して認識しており，照明光の変化によって物体の色の見えが変化するという認識は起きない．これは，視覚系の色恒常性と呼ばれ，物体の色認識においては，照明光の変化を柔軟に受け入れるという視覚系の特性である．

この色恒常性は，照明空間が存在する時のみ有効なのであるか？先行研究 [1] では，照明空間を持たない場合の色恒常性について検討し，CRT ディスプレイの色温度の違いだけであっても色恒常性が成り立つことを明らかにした．CRT ディスプレイの色温度とは，照明光を疑似的に再現したものであり，一般に 9300K に設定され，出荷されている．しかしながら，自然界の色温度は太陽光（昼間白色）の 6500K である．

本章ではまず，人間の視覚系における色覚メカニズムについて説明する．さらに，過去の色恒常性研究について紹介する．

1.2 色覚メカニズム

人間の視覚系には4種類の光受容器がある．そのうちの1つである桿体は暗所での視覚を主に担当する．残りの3種類の錐体は，分光感度のピーク波長が異なることから，L-，M-，S-錐体と呼ばれる．これらの錐体で発生した信号は，図 1.1 に示されるように「和の信号」である輝度チャンネル (L-錐体と M-錐体の和)，複数の錐体出力間の差の信号である r-g チャンネル (L-，M-錐体の出力の差)，y-b チャンネル (L-，M-錐体の和と S-錐体の出力の差) に変換され，高次レベルへ送られる．

このような色，輝度チャンネルへの信号の再構成は，網膜の中の光受容器から神経節細胞に至る前の段階で行われている．色恒常性は，光受容器の直後で発生する差の信号，すなわち色の信号に関して，視環境の変化へ適応するメカニズムとその集合体の効果が現れている複雑な現象である．図 1.1

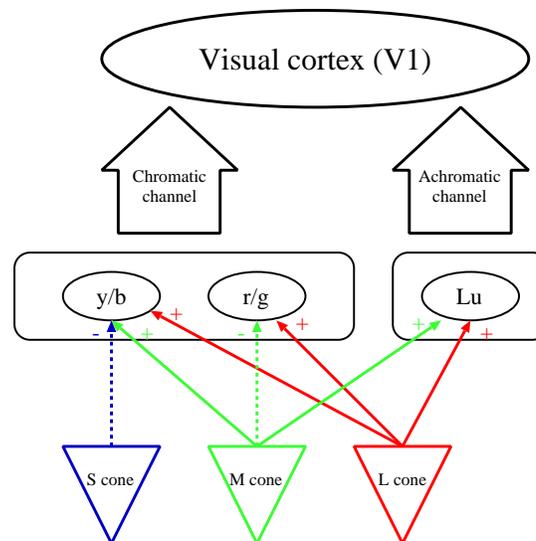


図 1.1 錐体からの出力は，輝度チャンネルと反対色チャンネルに分離され，大脳視覚野 V1 に送られる．

1.3 色恒常性について

色恒常性は、物体表面の色知覚に対して発生し、物体表面から眼球に入射するスペクトルにかかわらず同一物体から同一の色を知覚するという現象である。これは、照明光の変化や空間的配置の変化などの要因にかかわらず、同一物体から安定した色を知覚する現象である。

例えば、図 1.2 に示されるような、同じリンゴが太陽光と白熱電球に照らされた場合を比べてみる。光源から発せられてリンゴの表面で反射され人間の眼に入射する光のスペクトルは変化するが、人間は通常、このときのスペクトルの変化を照明光の変化であると判断し、リンゴそのものの色の变化と知覚しない。これが色恒常性である。

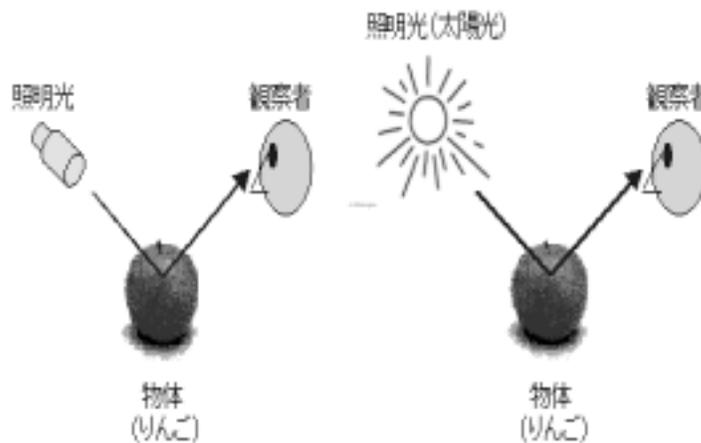


図 1.2 照明光の変化

この現象は古くから知られているが、物理的な視点からこの問題をとらえたのは 19 世紀の物理学者 von Helmholtz であると言われている。自発光体以外の物体表面は照明光の光を物体固有の分光反射で反射し、その反射光が人間の目にとらえられる。したがって、ある物体表面から眼球への入射スペクトルは照明光のスペクトルの変化に伴って変化する。このような変化に乱されることなく同一物体の色が変化しない知覚を得ることは、物理的には物体固有の分光反射率に相当する量を知覚していることになる。しかしながら、人間の視覚系にはそもそも分光分布を得る能力がないため、何らかの近似的な方法で物体固有の属性として色を知覚していると考えられる。

1.4 従来の色恒常性

従来の色恒常性の研究については、栗木一郎（色恒常性の神経計算理論，光学 28 巻，5 号，1999）に詳しくまとめられている．以下は，この文献より引用する．

1.4.1 実験手法

色恒常性の実験は，照明光が変化しても色の見えの知覚が安定しているかどうかを評価することを目的としており，大きく分けて，照明光の異なる 2 つの領域の間で物体色の見えを合わせる方法（非対称カラーマッチング法）と，単一の照明光の下で物体色を観察してカラーネーミングを行うなど，被験者が口頭で色の見えを報告する方法の 2 つについて分かれる．近年では、コンピュータディスプレイなどの画像呈示装置の発達により，異なる照明光の下での色票をコンピュータによって模擬した非対称カラーマッチング法が多く用いられている．

非対称カラーマッチング以外の方法としては，試験者にカラーネーミングによって色みを評価させる方法，多数の色票からテスト色票からテスト色票と同じであると感じる色票を選ぶ方法などがある．これらの方法は被験者にとってカラーマッチングほど不自然でないタスクであるという利点を持つ．いずれの方法も，カラーマッチングと同様の傾向を示すが，基本的に頑健な色恒常性を示す．

非対称カラーマッチング法では，被験者に与えるテスト刺激と被験者が色の見えを合わせるために操作するマッチング刺激の 2 つが別々の照明光に照明された視野に呈示される．2 つの刺激視野のうち，一方に基準白色照明光で照明した刺激を呈示することが多い．照明光は CIE(国際照明委員会)の標準光源 (C 光源，D 光源) など黒体放射軌跡上の色度点を持つものが主に用いられる．最近では太陽光の色度を示す D_{65} (相関色温度 6500K) 照明光が基準白色光として用いられる．基準光源として白色を選ぶこと自体はあまり疑問視されていないが，経験的に人間が白色の下での色の見えを評価する傾向があることが主な理由である．

非対称カラーマッチング法では，2 つの視野の間を交互に見比べてマッチング操作を行う

が、テストまたはマッチング刺激の一方を両眼で観察し、視野を交互に切り替えながらマッチングを行う方法と、両眼間に隔壁を設けて右/左にそれぞれテスト/マッチング刺激を呈示し、両方をそれぞれの目で同時に観察してマッチングを行う方法の2通りがある。前者は照明光の異なる2つの視野を交互に観察するため、視覚系の順応状態が不定になるおそれがある。後者は左右眼が個別に照明光に順応するため、単眼レベルでの状態は安定しているが、左/右眼の情報が右/左半視野ごとに統合される大脳皮質レベルでは、左右眼からの情報が統合されることから、両眼からの相互作用が色恒常性に影響する可能性が否定できない。このように、どちらの手法も不完全な条件での実験を余儀なくされるという欠点がある。

この欠点を解消する方法として Arend は被験者内基準であるユニーク色の見えを被験者に再現させ、このユニーク色の照明光による変化を測定する方法を行った。被験者は与えられた刺激を照らす照明光のもとで、自分がユニーク色(白, 赤, 青, 緑, 黄色)と思う色をCRTディスプレイ上に再現することを要求される。被験者が観察する刺激はマッチングするパッチとその周辺のみであり、被験者の目の前に存在する刺激の照明は1種類しかないために、照明条件が不定にならない。しかし、CRTを用いる都合上、ユニーク白色以外は被験者があらかじめ中彩度のユニーク色を作り出すための練習を行う必要がある。また、結果の解析のために必要となるユニーク色表面の分光反射率を想定するとき、白色以外のユニーク色を表面の分光反射率の推定には無理がある、などの欠点が報告されている。

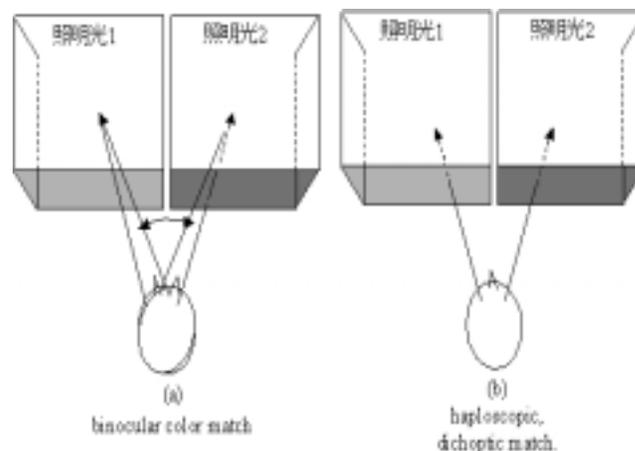


図 1.3 非対称マッチングの方法

1.4.2 結果とその傾向

Arend と Reeves は CRT ディスプレイに 6500K で照明したモンドリアン図形 (テスト刺激) と 4000K または 10000K の照明光で照明した同じモンドリアン図形 (マッチング刺激) を模擬した図を左右に同時に呈示し, この 2 つのマッチング実験を行った. 彼らの実験で行ったカラーマッチングの特徴は, 被験者に見た目の色を合わせる apparent Match と同じ紙であるように合わせる paper match の 2 種類の判断基準を使い分けるように指示したことである.

例として白色と非白色の照明光の下にある 2 つの表面色刺激を想定すると, apparent match は測光器で測定したときに同じ値ができるようにあわせるものであり, paper match は測光器の値が異なっても同じ紙であると被験者が感じられる色に合わせる, というものである. この実験で, 被験者は 1 秒おきに両者を見比べながらマッチングをするように指示されている. 明度知覚における恒常性成立度の指標である Brunswik ratio に類似した constancy index を $u'v'$ 色度図上での距離の比で定義し, 得られた結果をこの指標に基づいて評価したところ, 瞬時的に視野を切り替える方法でも色恒常性が得られた, と報告している. ただ, 被験者 3 人のうち色恒常性の成立度の高かった 2 人が論文の著者であったため, 結果の解釈をめぐる議論が様々になされ, 結局, 色恒常性はあまり得られなかったという結論に達している. [3]

1.5 研究内容

1.5.1 先行研究 [1]

先行研究では, 照明空間を持たないディスプレイ上の画像だけを見た場合には, 視覚系の色恒常性が照明空間を伴ったときと同様に起こるかどうか, また, 錐体や網膜の順応をきちんと制御しなければ, それらのレベルの順応に依存している色恒常性メカニズムは計算どおり働かないかということを検討した. このとき, 3 つの問題点が出てきた.

- 照明空間の問題

現在までの色恒常性の実験では、数多くなされてきた。しかし、これらのほとんどが、照明空間を伴った実験であった。そこで、照明空間を持たない CRT ディスプレイ上の画像だけを見た場合には、視覚系の色恒常性が同様に起こるかどうか。

- 錐体や網膜順応の問題

過去の研究では、Haploscopic などの手法を用いて、ある特定の照明に対する錐体や網膜の順応状態が正確に制御されていた。では、錐体や網膜の順応を正確に制御しなければ、それらのレベルの順応に依存している色恒常性メカニズムの一部は計算どおり働かないのではないか。

- CRT 上に色を表示する際の実用上の問題

一般的なコンピュータシステムでは、画像の色と光度は RGB の階調 (K_{Red} , K_{Green} , K_{Blue}) で表現される。では、異なる色温度に設定されたディスプレイに表示された場合でも、RGB 階調値が同じであれば、同じ色票 (Paper Match) として知覚されるのか。

これらの3つの疑問を解決するために、ディスプレイの色温度が色の見えに与える影響と、それに伴う色恒常性の効果の度合いを検証し、また、異なる色温度のディスプレイ上で色恒常性の効果は生じているのか、錐体順応を表す von Kries 型順応式で説明可能かどうか、Matching 色の予測は可能かどうかを検証した。

1.5.2 本研究の目的

本研究では 9300K に設定した CRT ディスプレイと 6500K に設定した CRT ディスプレイの2つを使用し、呈示された刺激を paper Match することで色恒常性が成り立つかどうか検討した。また、色恒常性が、錐体順応のみで決定されるのかどうかを検討するために錐体レベルが異なると考えられる3つの刺激呈示条件を採用し、実験を行った。

第 2 章

実験

2.1 実験条件

先行研究 [1] では、照明空間を持たない刺激呈示方法として異なる色温度をもつ CRT ディスプレイ上の画像を両眼自由視で比較した場合での色恒常性について検証した。その結果、照明空間がない場合においても色恒常性が見られ、順応は von Kries 型順応式 [3] で説明可能であった。この実験では、両眼自由視で刺激を観察していたため、錐体順応が高速で起こっている可能性がある。

そこで本研究では、錐体順応レベルが異なるよう刺激の観察条件を変え、実験を行なった。錐体順応レベルが異なる条件下で、視覚系の色恒常性がどのように変化するのかを検証した。錐体順応レベルの条件は以下の 3 つを採用した。

両眼自由視条件 (対照実験)

両眼で自由に CRT ディスプレイを観察し、マッチングを行なう。この実験の結果を中心に実験 2 と実験 3 を比較する。このときの錐体順応は中程度だと考えられる。

Haploscopic 呈示条件

並置した 2 つの CRT ディスプレイの間に仕切り板を設置し、左右の視野を分離してマッチングを行なう。右目は右の CRT を観察し、左目は左の CRT を観察した。片眼呈示となるため、それぞれのディスプレイに順応しやすくなると考えられる。そのため、このときの錐体順応レベルは強いと考えられる。

シャッターを用いた短時間呈示条件

被験者と CRT ディスプレイの間にシャッターを設置し，刺激呈示時間を制御してマッチングを行なう．錐体順応が高速で起こっている可能性があるため，シャッターを用いて刺激呈示時間を短くした．シャッターの開閉間隔は 10 秒間に 1 回，1 秒間だけ開くようにセットした．そのため，このときの錐体順応レベルは弱いと考えられる．

2.2 実験装置

実験は暗室ブース内で行なわれた．暗室ブースは市販のファンゲル材と黒色ボード板黒を用いて製作した．暗室ブースの大きさは，180cm × 240cm (奥行 × 幅 × 高さ) で，その中に机，椅子，実験用 PC，刺激呈示用 CRT ディスプレイ 2 台を設置した．図 2.1 に暗室内の概略図を示す．被験者は暗室内の椅子に自由な姿勢で座った．2 台のディス

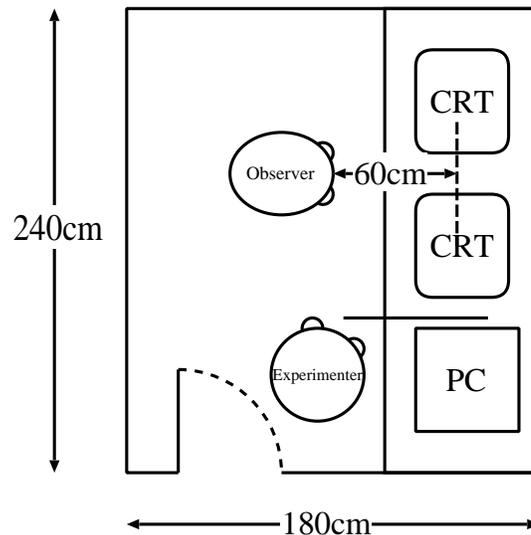


図 2.1 暗室内の概略図．実験中，被験者と実験者は一緒に暗室内に入る．

プレイを結んだ線分と，被験者との距離を 60cm とし，固定した．実験中は実験者も暗室に入り被験者を観察した．

被験者が見るものは，ディスプレイ上の刺激のみとするため，CRT ディスプレイには覆いをかけ，ディスプレイ上にあるメニューバーや，電源ランプ等からの光を排除した．さらに，実験者の操作や実験者が視界に入らないように，実験者と被験者の間には，黒の遮断板

を設置した。これは、被験者が実験をする上で、他のものに気が散ってしまい、結果に影響がないようにするためである。被験者 3 人に対して全て同じ環境で行なった。実験中、被験者が見るものは実験刺激のみである。

2.3 被験者

実験に参加した被験者は以下の 3 名である。

S.T

22 歳の女性で色覚正常。著者である。

C.M

22 歳の女性。色覚正常。

K.H

22 歳の男性。色覚正常。

被験者 C.M と被験者 K.H は、実験目的については何も知らないナイーブな被験者で、実験開始前に色覚検査を行った。色覚検査については付録 A で詳しく述べる。

2.4 刺激

実験に用いた刺激は、334 万画素のデジタルカメラ XV-3 (CASIO) によって 14 時に撮影された自然画像である。画像は、図 2.2 に示すような、人が野外で灰色枠付の色票を持った画像である。画像の背景には、落葉や芝生が含まれている。この画像中の色票部分を Adobe Illustrator を用いて加工した。

刺激呈示用 PC は、2 台の CRT ディスプレイと接続されている。CRT ディスプレイは RD17GX (三菱) と RD17V(三菱) を使用し、明るさとコントラストは工場出荷時の設定を使用した。2 台の CRT ディスプレイは、それぞれ別々の色温度とし、基準となる右側に置いたディスプレイは 6500K、マッチングを行なう左側のディスプレイは 9300K に設定した。



図 2.2 実験刺激．ディスプレイの周辺はボードで覆われ，刺激画像のみが呈示される．

実験開始前に，2 台の CRT ディスプレイそれぞれの測光を行なった．測光は CS-1000(MINOLTA) を用い，基準白色の測光結果は以下の通りである．

- 6500K に設定された CRT の基準白色 $(x,y) = (0.315, 0.328)$ (最高輝度 $176\text{cd}/\text{m}^2$)
- 9300K に設定された CRT の基準白色 $(x,y) = (0.237, 0.295)$ (最高輝度 $173\text{cd}/\text{m}^2$)

シャッターを使用した実験条件では，F77 と電磁シャッターコントローラ (SURUGA SEIKI) を使用し，ノート PC と接続しシャッターを制御した．

2.5 実験手順

2 台の CRT ディスプレイに同じ刺激画像を呈示した．始めに，色温度を 6500K に設定した右側の CRT に表示される基準色票を Illustrator を用いて作成した．作成した基準色票は，彩度がすべて 70，明度がすべて 90 とした．色相は 10 から 330 まで 20 刻みで 18 通りである．この色相の値は 0 が赤の色相を示す色相環の角度を示している．合計 18 通り

の基準色票を作成し，実験に使用した．

実験開始前，被験者には装置の操作方法，判断条件についての説明を行なった．判断条件である paper match については特に強調して説明をした．

実験では，被験者が，色温度を 9300K に設定した左側の CRT 上の色票が，右のディスプレイに呈示されている色票と同じ紙になったと思う (paper match) まで，左側の CRT に呈示された色票を HSB(色相-彩度-明度) の全てのパラメータを調節することでマッチングを行なった．

実験はおよそ 1 時間で終了し，3 つの錐体順応条件についてそれぞれ 3 セット行なった．

第3章

実験結果

被験者のマッチング結果を測光器で測定し，得られた L_v (輝度)， x ， y の値の平均値を計算し x ， y 色度図上にプロットした．平均値の計算方法は以下の通りである．

1． x, y, L を X, Y, Z に変換する．

$$\begin{cases} X_1 = x_1 \times 2x + \frac{L_1}{y_1} \\ Y_1 = y_1 \times \frac{L_1}{y_1} \\ Z_1 = (1 - x_1 - y_1) \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & L_1 \\ x_2 & y_2 & L_2 \\ x_3 & y_3 & L_3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 \end{pmatrix}$$

2． X, Y, Z の平均をだす．

$$\begin{cases} X_{AVE} = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{L_1 + L_2 + L_3} \\ Y_{AVE} = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} \\ Z_{AVE} = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{3} \end{cases}$$

3． $X_{AVE}, Y_{AVE}, Z_{AVE}$ を $x_{AVE}, y_{AVE}, L_{AVE}$ に変換する．

$$\begin{cases} x_{AVE} = \frac{X_{AVE}}{X_{AVE} + Y_{AVE} + Z_{AVE}} \\ y_{AVE} = \frac{Y_{AVE}}{X_{AVE} + Y_{AVE} + Z_{AVE}} \\ L_{AVE} = Y_{AVE} \end{cases}$$

縦軸を x ，横軸を y とする．

3.1 実験1 両眼自由視条件

両眼自由視条件で行った実験結果を図 3.1 に示す。

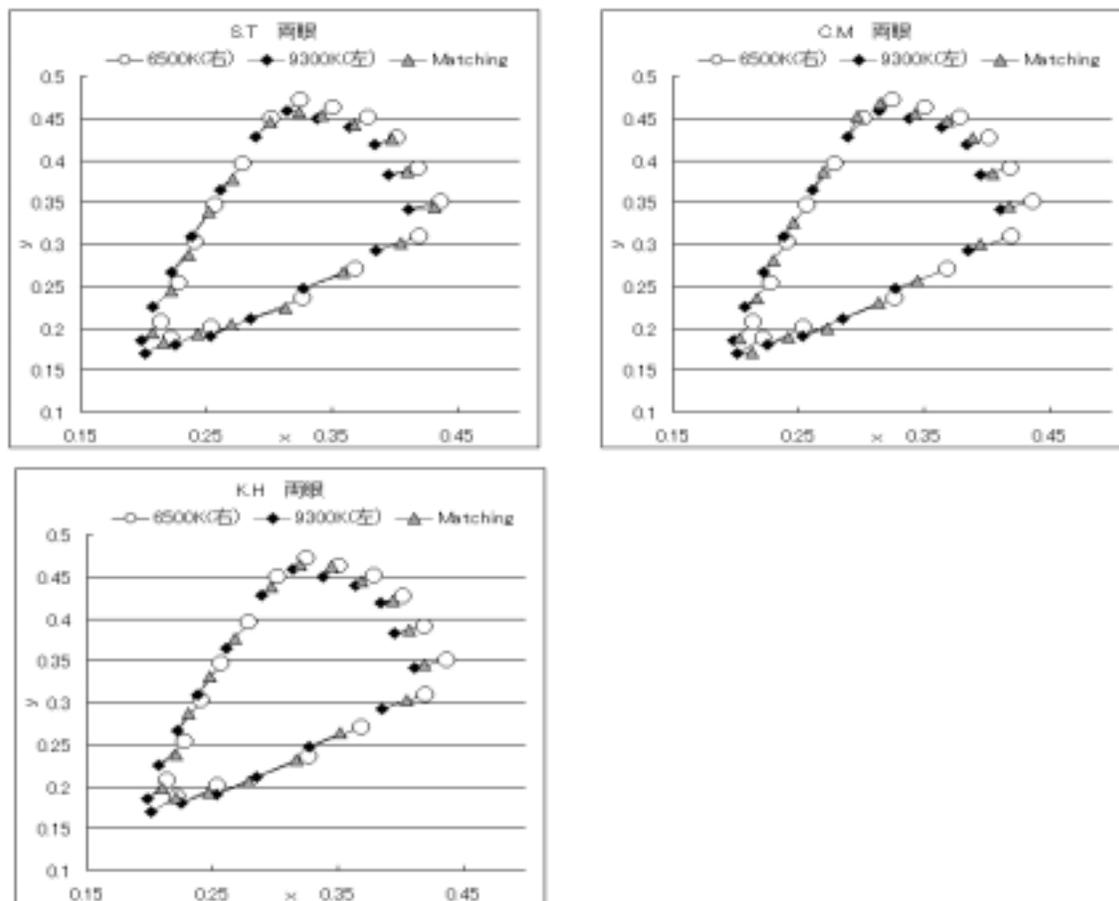


図 3.1 実験1 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)

多少の個人差はあるものの、全体的に 6500K と 9300K の中間の色度座標に合わせた。実験1の結果を次の実験2と実験3と比較する。

3.2 実験2 Haploscopic 呈示条件

Haploscopic 呈示条件で行った実験結果を図 3.2 に示す。

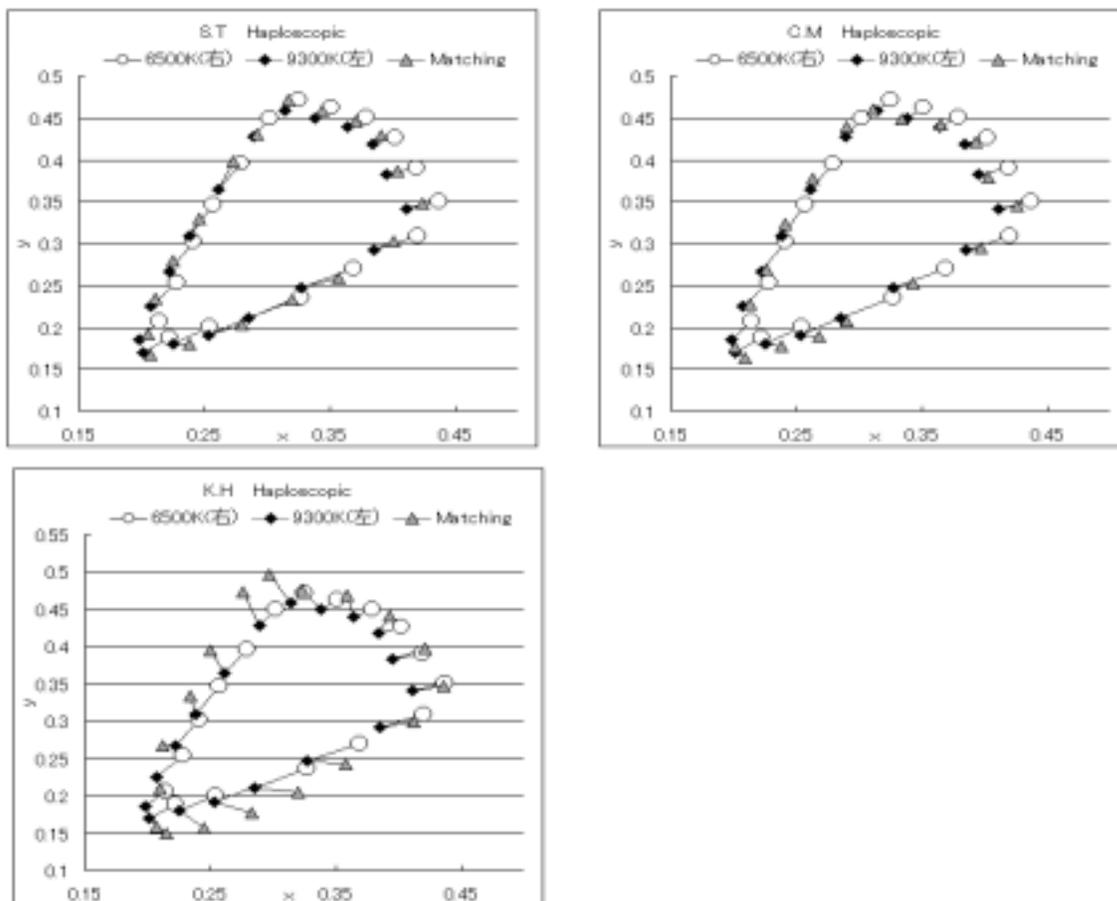


図 3.2 実験2 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)

実験1とは異なり、マッチング結果にプロットした座標の差が生じていた。その理由は、ディスプレイの色温度に原因があると考えられる。まず、ディスプレイの色温度は右のCRTが6500K、左のCRTが9300Kである。見た目としては、6300Kに設定したCRTの色見えは黄色味を帯びており、9300Kに設定したCRTの色見えは青白く見える。さらに、Haploscopic呈示により、それぞれの目がそれぞれのディスプレイに強く順応していると考えられるため、右のCRTで見た色を左のCRTでマッチングするときに、左のCRTの色を極端に明るく感じてしまい、マッチング結果に差が生じたものと思われる。実験終了後、両眼でディスプレイを見ると、明らかに色が違うことに被験者達は驚いていた。

3.3 実験3 シャッターによる短時間呈示条件

シャッターによる短時間呈示条件で行った実験結果を図 3.3 に示す。

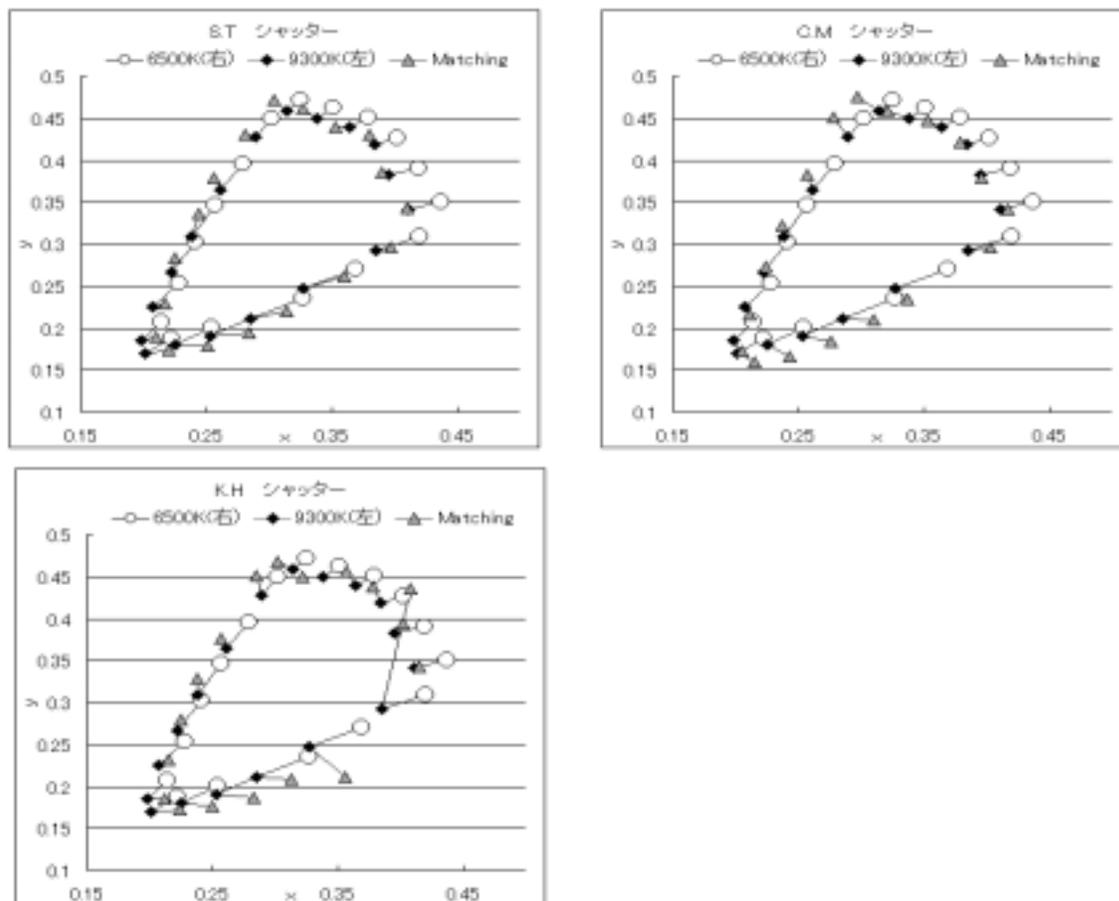


図 3.3 実験3 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)

図 3.1 と図 3.2 と比較すると、グラフにかなりのばらつきが生じている。その理由として、輝度の呈示時間が短いことがあげられる。シャッターは 10 秒に 1 回 1 秒間しか開かないため、およそそのところまでマッチングできるが、実験 1 や実験 2 のように色を詳細に見分けることが非常に困難であった。実験時間を長くしたとしても、ある一定の色までしかマッチングできなかったと考えられる。

第 4 章

考察

4.1 考察 1

本研究で採用した 3 つの実験条件において，色恒常性の効果が生じているか検討した．初めに，実験で使用した 18 種類の刺激の L(輝度)， x ， y (6500K，9500K，被験者のマッチングした色) より 3 種類の錐体応答量 L, M, S を計算した．次に，横軸 $L-2M$ ，縦軸 S でプロットしグラフを作成し， x, y 色度図でプロットしたグラフと比較した．

4.1.1 錐体分光感度

錐体は視覚情報処理の入り口であり，光刺激の物理的情報を生理的電気信号に変換するところである．したがって，視覚，特に色覚と光刺激の物理量とを関係づけて定量的に扱うために，その分光感度はきわめて重要なものである．錐体の分光感度を求めるためにいろいろな方法が提案されているが，本研究では，そのなかでも最も受け入れられている方法である等色実験から錐体分光感度を求める方法を採用した．[4]

L, M, S 錐体の分光感度 $(l(\lambda), m(\lambda), s(\lambda))$ は，原刺激 R, G, B に対する錐体の感度 $(l_R, l_G, l_B, m_R, m_G, m_B, s_R, s_G, s_B)$ と等色関数 $(\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda))$ との線形結合で表され，式 (4.1) で表される．

$$\begin{pmatrix} l(\lambda) \\ m(\lambda) \\ s(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_R & l_G & l_B \\ m_R & m_G & m_B \\ s_R & s_G & s_B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

等色関数から錐体分光感度の変換式を求めると式 (4.2) のようになる．

$$\begin{pmatrix} l(\lambda) \\ m(\lambda) \\ s(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15514 & 0.54312 & -0.03286 \\ -0.15514 & 0.45684 & 0.03286 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

式 (4.1) と式 (4.2) より L, M, S を計算する .

$$\begin{pmatrix} X = \frac{x}{y}Y \\ Y = Y \\ Z = \frac{1-x-y}{y}Y \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} L = \frac{1}{b+d} \left(a \times \frac{x}{y} + b - c \times \frac{1-x-y}{y} \right) Y \\ M = \frac{1}{b+d} \left(-a \times \frac{x}{y} + d - c \times \frac{1-x-y}{y} \right) Y \\ S = \frac{1-x-y}{y} Y \end{cases} \quad \begin{cases} a = 0.15514 \\ b = 0.54312 \\ c = 0.03286 \\ d = 0.45684 \end{cases} \quad (4.4)$$

以上より, S と $L-2M$ を求め, プロットした .

4.1.2 実験 1 両眼自由視条件

両眼自由視条件で得られた結果を縦軸 S, 横軸 L-2M でプロットした結果を図 4.1 に示す.

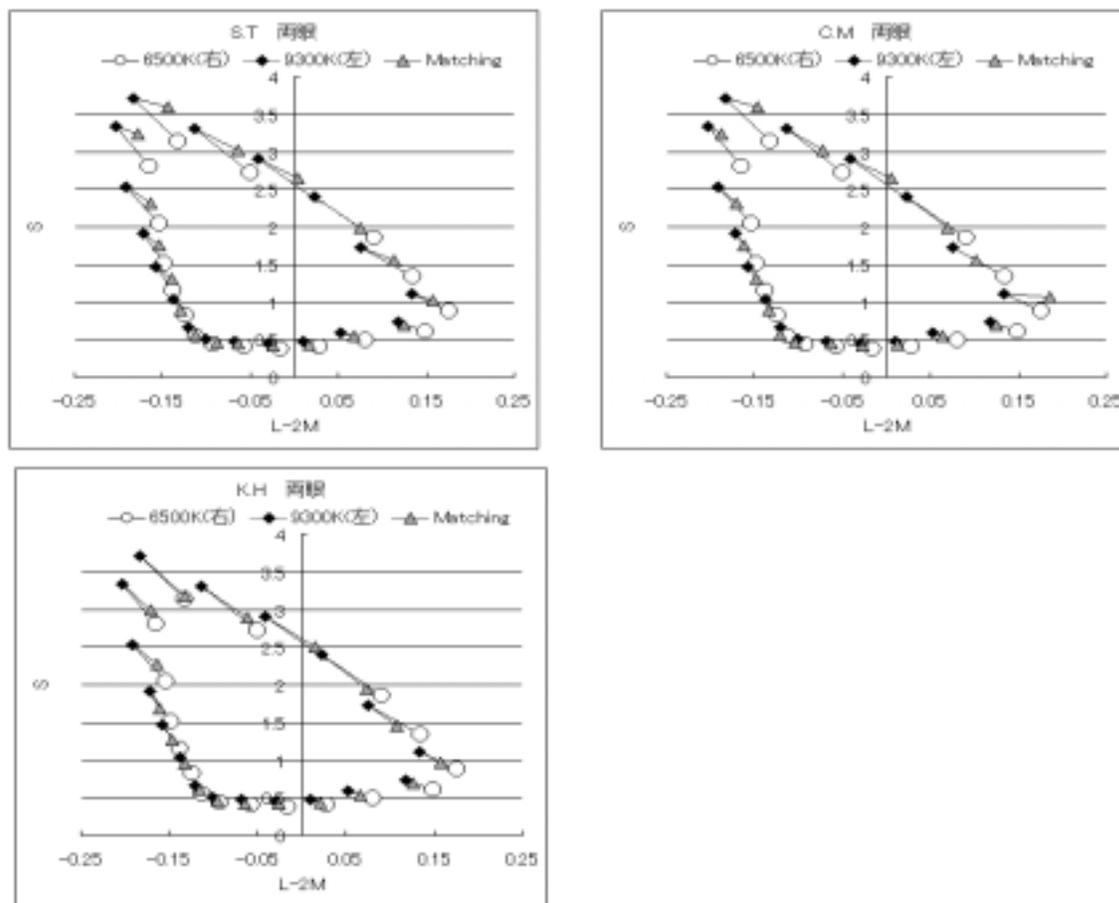


図 4.1 実験 1 S.T.(左上), C.M.(右上), K.H.(左下)

6500K の近くに CRT で表した基準色票をマッチングした色と, 9300K CRT 上で基準色票と同じ RGB 階調値を表示した色に分けられた.

4.1.3 実験 2 Haploscopic 呈示条件

Haploscopic 呈示条件で得られた結果を縦軸 S, 横軸 L-2M でプロットした結果を図 4.2 に示す.

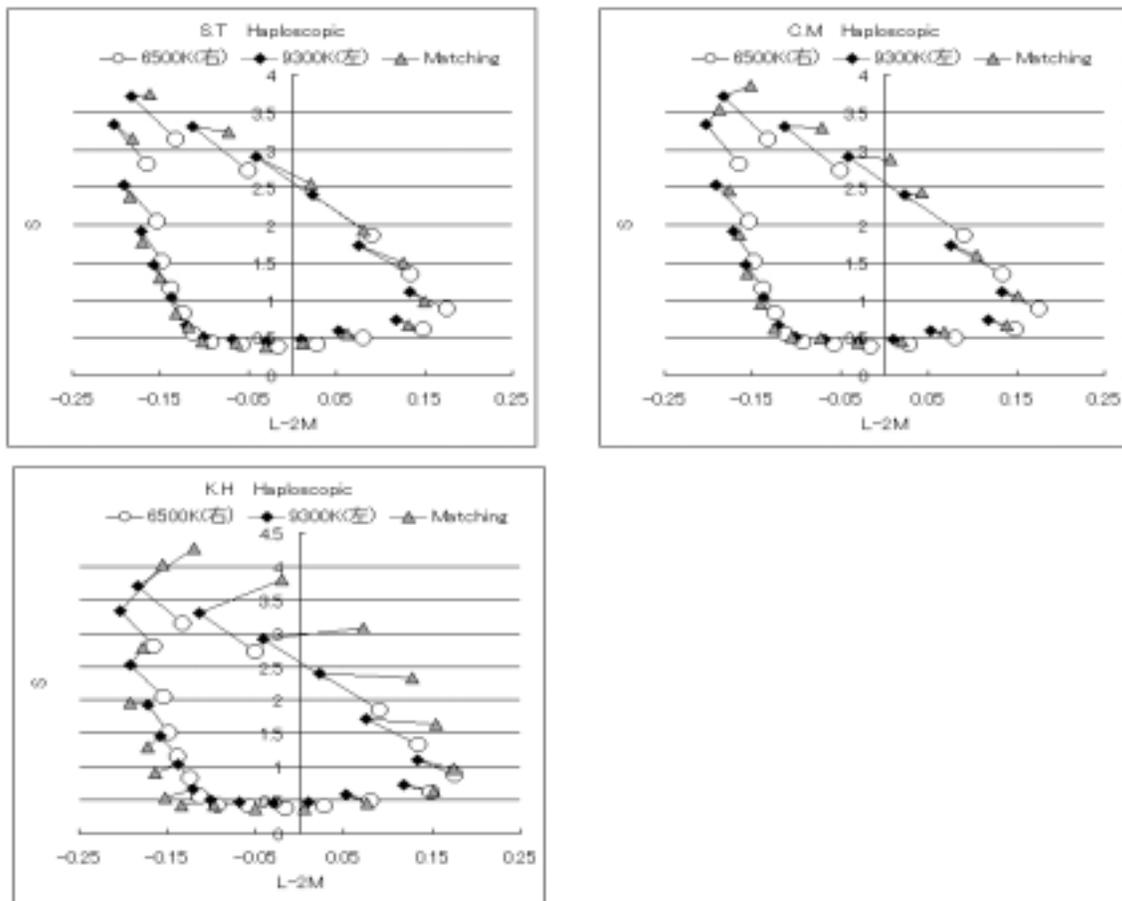


図 4.2 実験 2 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)

6500K の近くに CRT で表した基準色票をマッチングした色と, 9300K CRT 上で基準色票と同じ RGB 階調値を表示した色に分けられた.

4.1.4 実験 3 シャッターによる短時間呈示条件

シャッターによる短時間呈示条件で得られた結果を縦軸 S, 横軸 L-2M でプロットした結果を図 4.3 に示す。

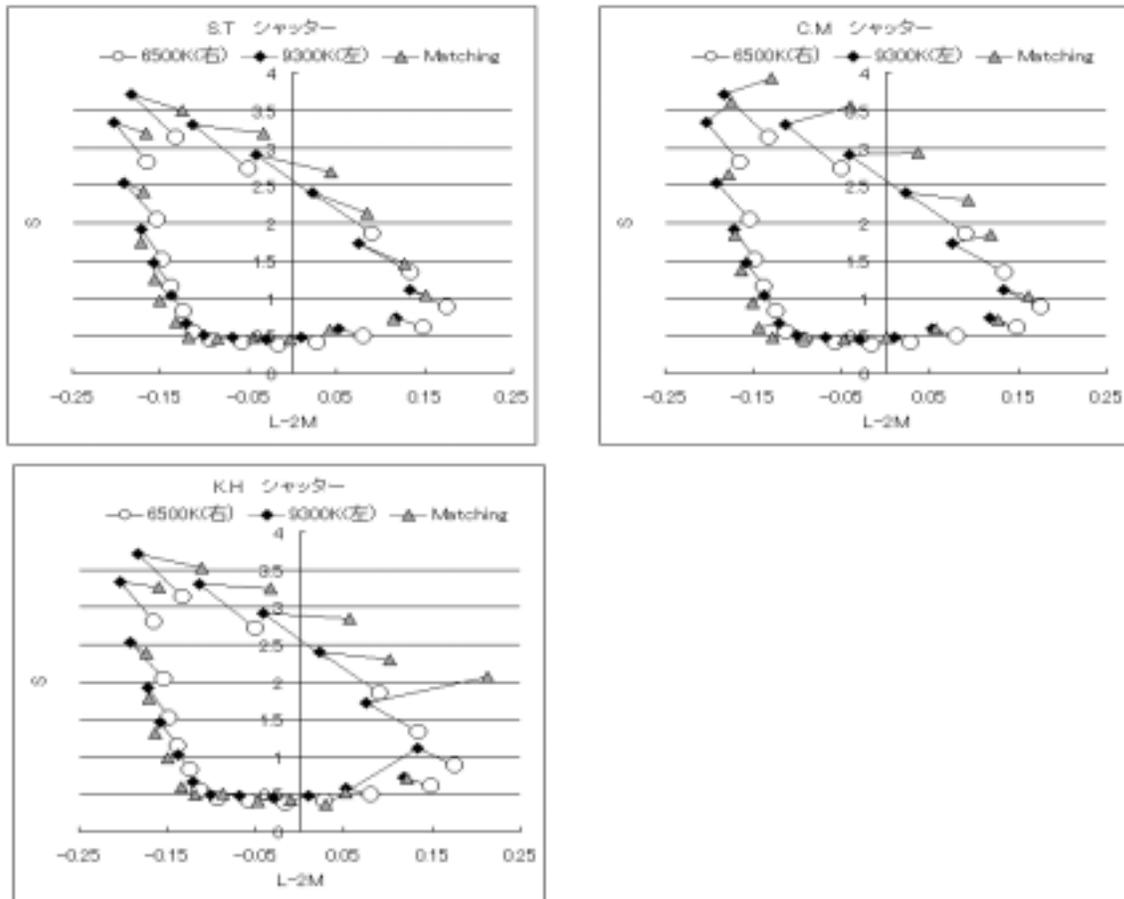


図 4.3 実験 3 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)

6500K の近くに CRT で表した基準色票をマッチングした色と 9300K CRT 上で基準色表と同じ RGB 階調値を表示した色に分けられた。

4.1.5 考察 1 のまとめ

S vs L-2M 空間でプロットしたマッチング結果は, x y 色度図上でプロットした場合と同様に, 物理的なマッチングとも, 同じ階調値を 9300K の CRT に出した場合とも異なる色となっている。このことは, 限定的ではあるが, 色恒常性的な効果が生じていることを示し

ている．図 4.2 , 図 4.3 でのグラフのばらつきは図 4.1 と同様に起こっている．

4.2 考察 2 - von Kries 型順応式

von Kries は、人間の目の光受容器が 3 種類であったとすると、照明光に対する各光受容器の応答に逆比例する係数を各受容器の出力に掛けるように感度調節すれば、照明光の変化に伴う視覚系の応答の変化が小さくなると考え、式 (4.5) に示されるモデルを仮定した。

$$R'_i = k_i \times R_i \quad (4.5)$$

ただし、

$$K_i = 1/R_i^{illum} \quad , \quad i = L, M, S \quad (4.6)$$

(R_i^{illum} は照明光に対する i 錐体 ($i = L, M, S$) の応答量を表す。)

本実験において von Kries 型順応式が成り立つのであれば、式 (4.6)、式 (4.7) が成立する。

$$R'_{i,6500} = R_{i,6500}/R_{i6500}^{illum} \quad (4.7)$$

$$R'_{i,9300Matching} = R_{i,9300Matching}/R_{i9300}^{illum} \quad (4.8)$$

Matching が成立しているので、

$$R'_{i,6500} = R'_{i,9300Matching}$$

となり、

$$R_{i,9300Matching}/R_{i,6500} = R_{i9300}^{illum} = C$$

となる。従って、6500K の基準色票の錐体応答量 $S_1, (L - 2M)_1$ と Paper Matching の結果の錐体応答量 $S_3, (L - 2M)_3$ の間には、式 (4.9)、式 (4.10) が成立する。

$$S_3/S_1 = C_S \quad (4.9)$$

$$(L - 2M)_3/(L - 2M)_1 = C_{(L-2M)} \quad (4.10)$$

ただし，錐体応答量のゼロレベルに一定のずれがあるとすると，式 (4.11)，式 (4.12) となる．

$$S_3 = C_S \times S_1 + C_{S2} \quad (4.11)$$

$$(L - 2M)_3 = C_{(L-2M)} \times (L - 2M)_1 + C_{(L-2M)2} \quad (4.12)$$

ただし， $C_{S2}, C_{(L-2M)2}$ は定数である．

次節では，横軸 S_1 ，縦軸 S_3 でプロットしたグラフと，横軸 $(L - 2M)_1$ ，縦軸 $(L - 2M)_3$ で再プロットし，式 (4.11)，式 (4.12) が成り立つかどうか検討した．

4.3 Sにおける近似直線

4.3.1 実験1 両眼自由視条件

両眼自由視条件でのSにおける近似直線を図4.4に示す。

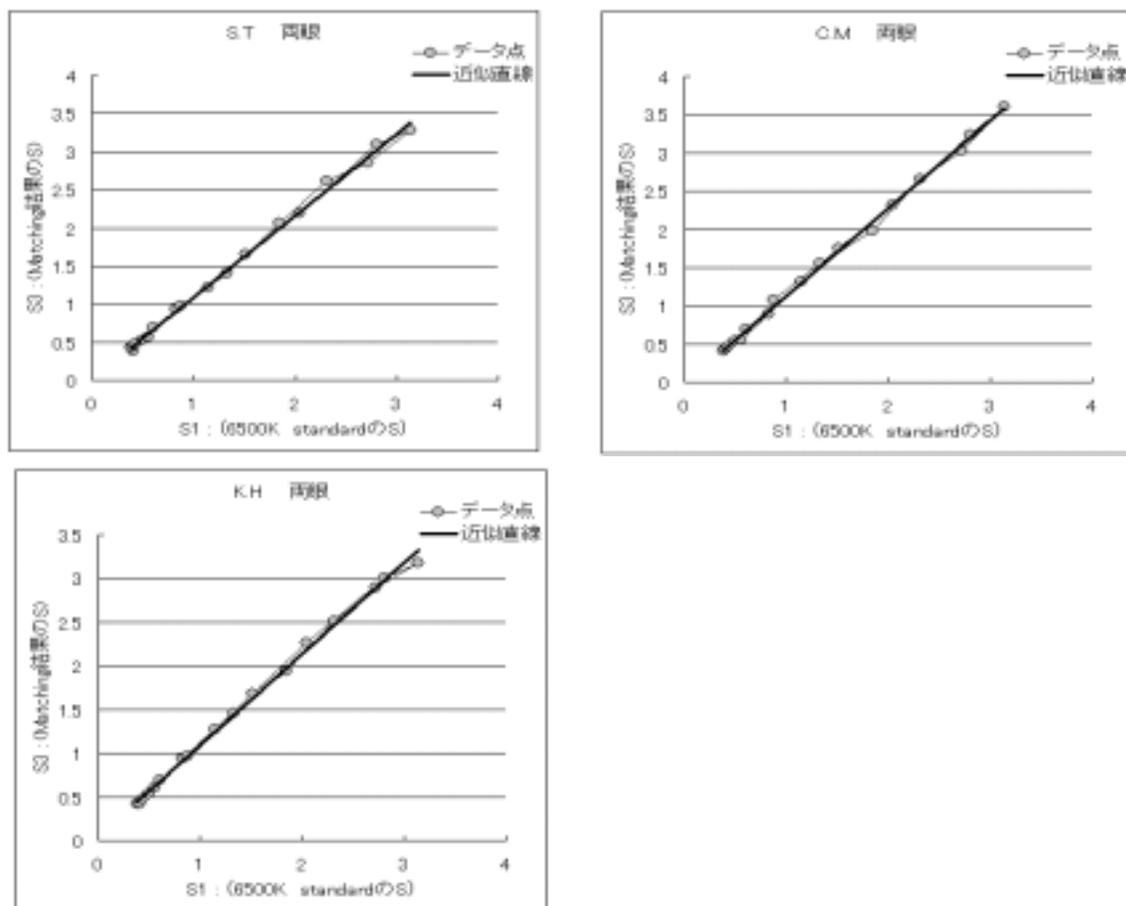


図4.4 実験1 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)の近似直線

評価：最小2乗法より，求めた近似直線は

$$\text{S.Tは } S_3 = 1.06 \times S_1 - 0.02$$

$$\text{C.Mは } S_3 = 1.16 \times S_1 - 0.02$$

$$\text{K.Hは } S_3 = 1.06 \times S_1 - 0.02$$

となる。

4.3.2 実験2 Haplosopic 呈示条件

Haplosopic 呈示条件での S における近似直線を図 4.5 に示す。

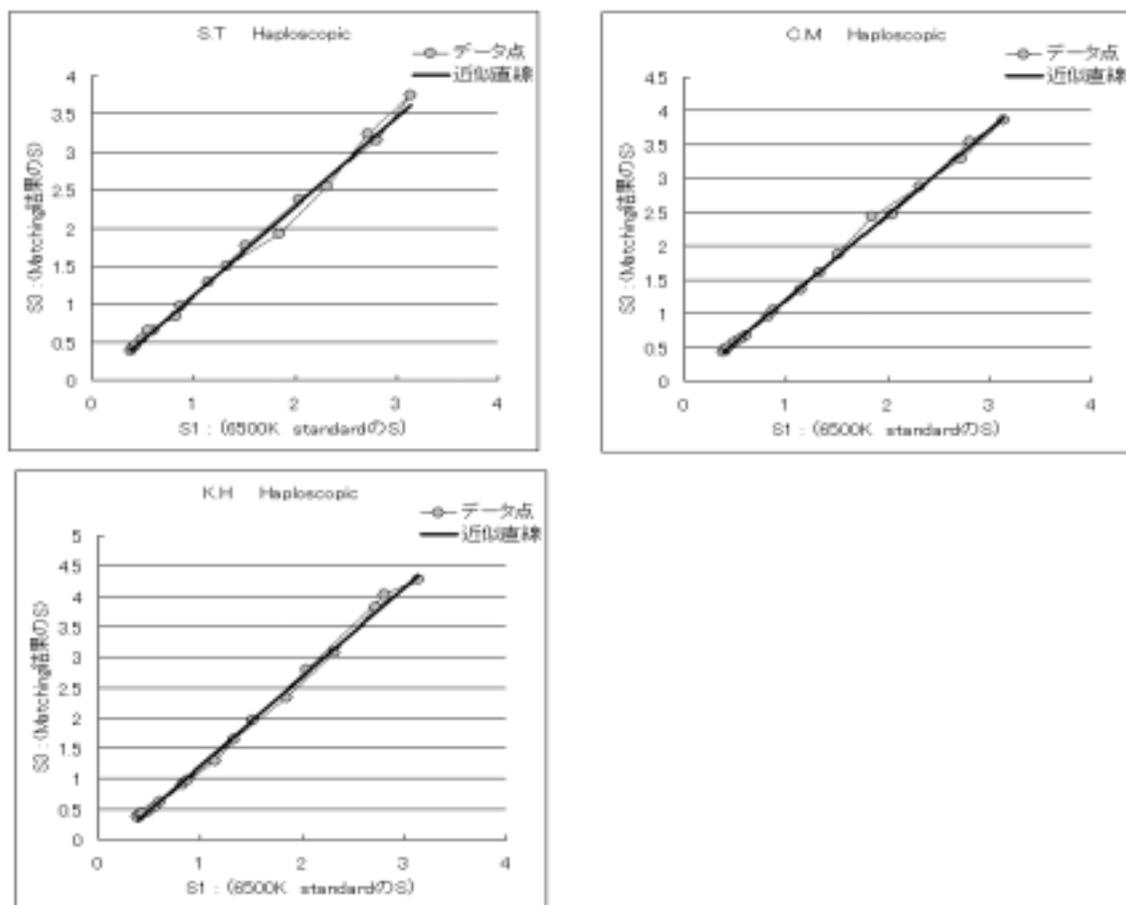


図 4.5 実験2 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下) 近似直線

評価：最小2乗法より，求めた近似直線は

S.T は $S_3 = 1.18 \times S_1 - 0.06$

C.M は $S_3 = 1.24 \times S_1 - 0.04$

K.H は $S_3 = 1.44 \times S_1 - 0.24$

となる。

4.3.3 実験3 シャッターによる短時間呈示条件

シャッターによる短時間呈示条件でのSにおける近似直線を図4.6に示す。

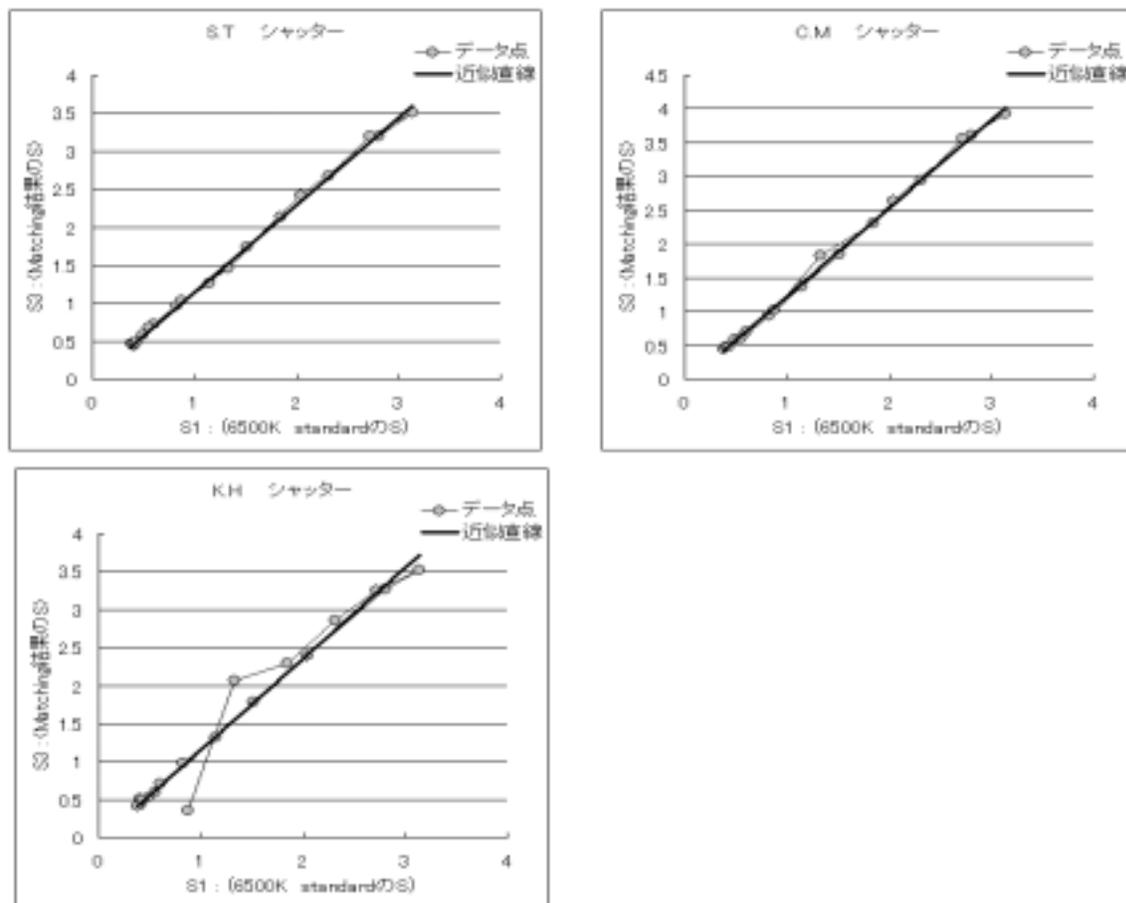


図4.6 実験3 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下)の近似直線

評価：最小2乗法より，求めた近似直線は

S.Tは $S_3 = 1.13 \times S_1 - 0.03$

C.Mは $S_3 = 1.30 \times S_1 - 0.08$

K.Hは $S_3 = 1.20 \times S_1 - 0.04$

となる。

4.3.4 錐体応答量の関係

RGB 値において、同じ色票が 6500K のディスプレイとに呈示される場合の錐体応答量の関係を図 4.7 に示す。

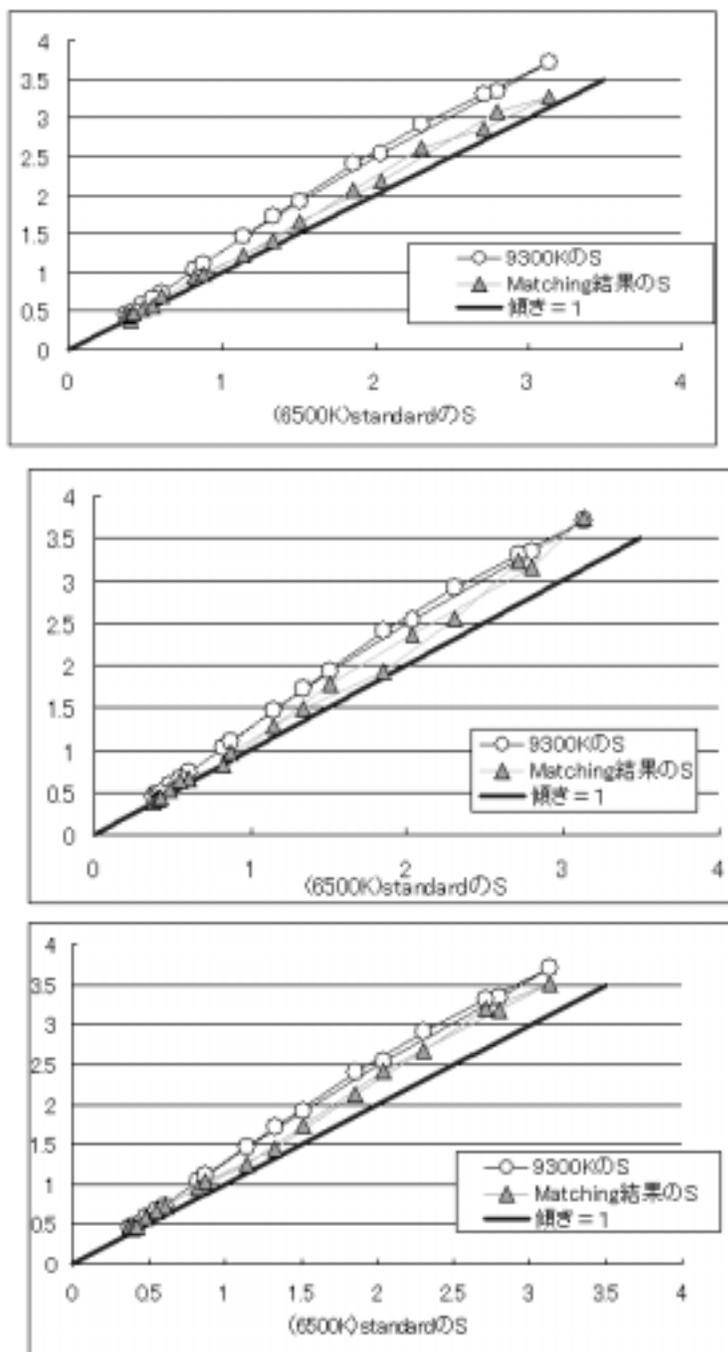


図 4.7 実験 1 (上), 実験 2 (真ん中), 実験 3 (下)

4.4 L-2M における近似直線

4.4.1 実験 1 両眼自由視条件

両眼自由視条件での L-2M における近似直線を図 4.8 で示す。

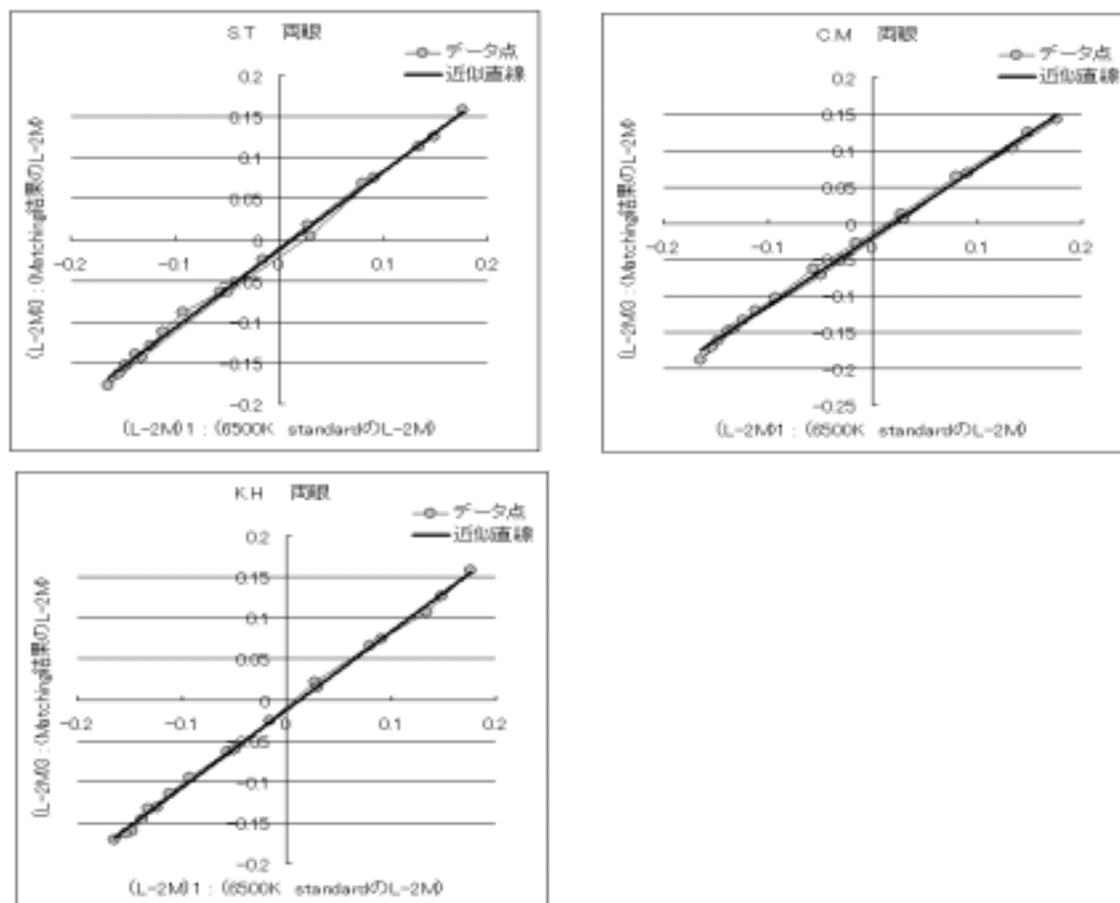


図 4.8 実験 1 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下) の近似直線

評価：最小 2 乗法より，求めた近似直線は

$$\text{S.T は } (L - 2M)_3 = 0.95 \times (L - 2M)_1 - 0.01$$

$$\text{C.M は } (L - 2M)_3 = 0.95 \times (L - 2M)_1 - 0.02$$

$$\text{K.H は } (L - 2M)_3 = 0.96 \times (L - 2M)_1 - 0.01$$

となる。

4.4.2 実験2 Haplosopic 呈示条件

Haplosopic 呈示条件での L-2M における近似直線を図 4.9 で示す。

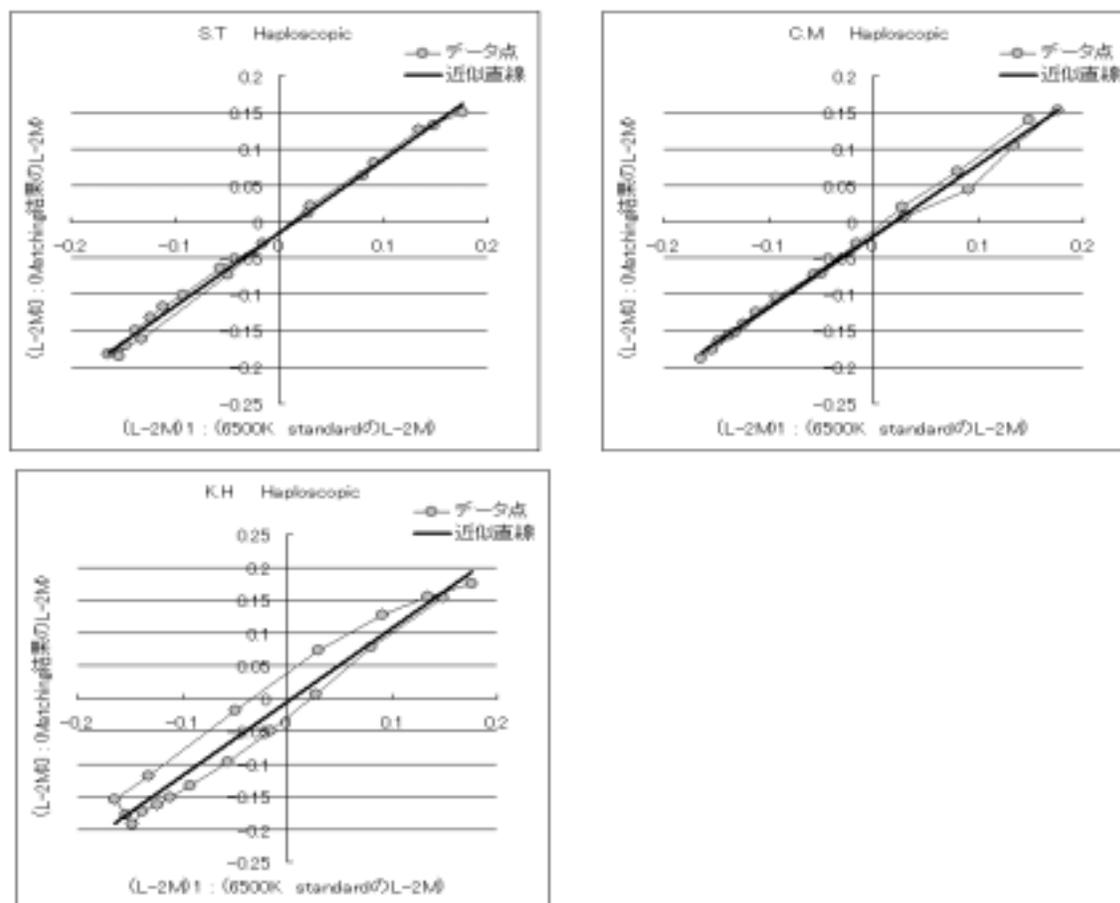


図 4.9 実験2 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下) の近似直線

評価：最小2乗法より，求めた近似直線は

$$\text{S.Tは } (L - 2M)_3 = 0.99 \times (L - 2M)_1 - 0.01$$

$$\text{C.Mは } (L - 2M)_3 = 0.98 \times (L - 2M)_1 - 0.02$$

$$\text{K.Hは } (L - 2M)_3 = 1.13 \times (L - 2M)_1 - 0.02$$

となる。

4.4.3 実験3 シャッターによる短時間呈示条件

シャッターによる短時間呈示条件での L-2M における近似直線を図 4.10 で示す。

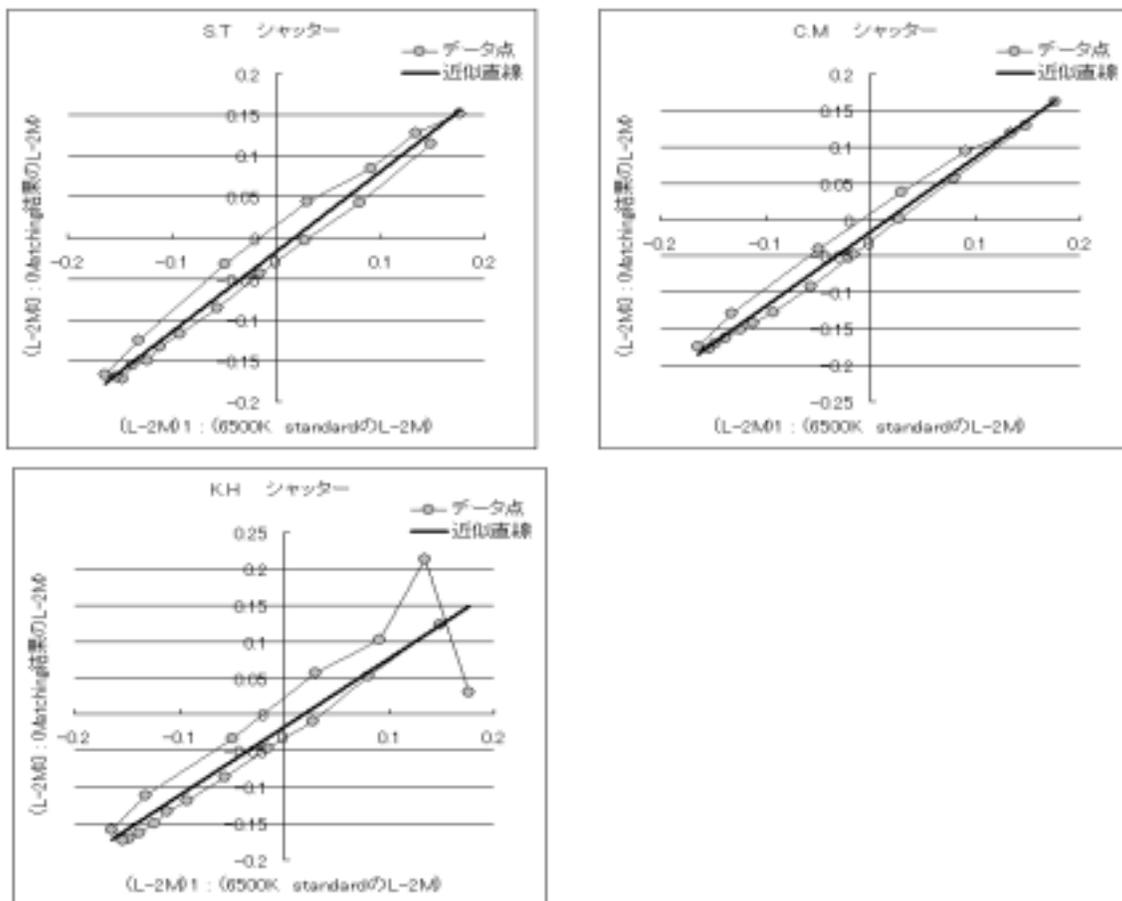


図 4.10 実験3 S.T(左上), C.M(右上), K.H(左下) の近似直線

評価：最小2乗法より，求めた近似直線は

$$\text{S.Tは } (L - 2M)_3 = 0.99 \times (L - 2M)_1 - 0.02$$

$$\text{C.Mは } (L - 2M)_3 = 1.03 \times (L - 2M)_1 - 0.02$$

$$\text{K.Hは } (L - 2M)_3 = 0.99 \times (L - 2M)_1 - 0.02$$

となる。

4.4.4 錐体応答量の関係

RGB 値において、同じ色票が 6500K のディスプレイとに呈示される場合の錐体応答量
 関係を図 4.11 に示す。

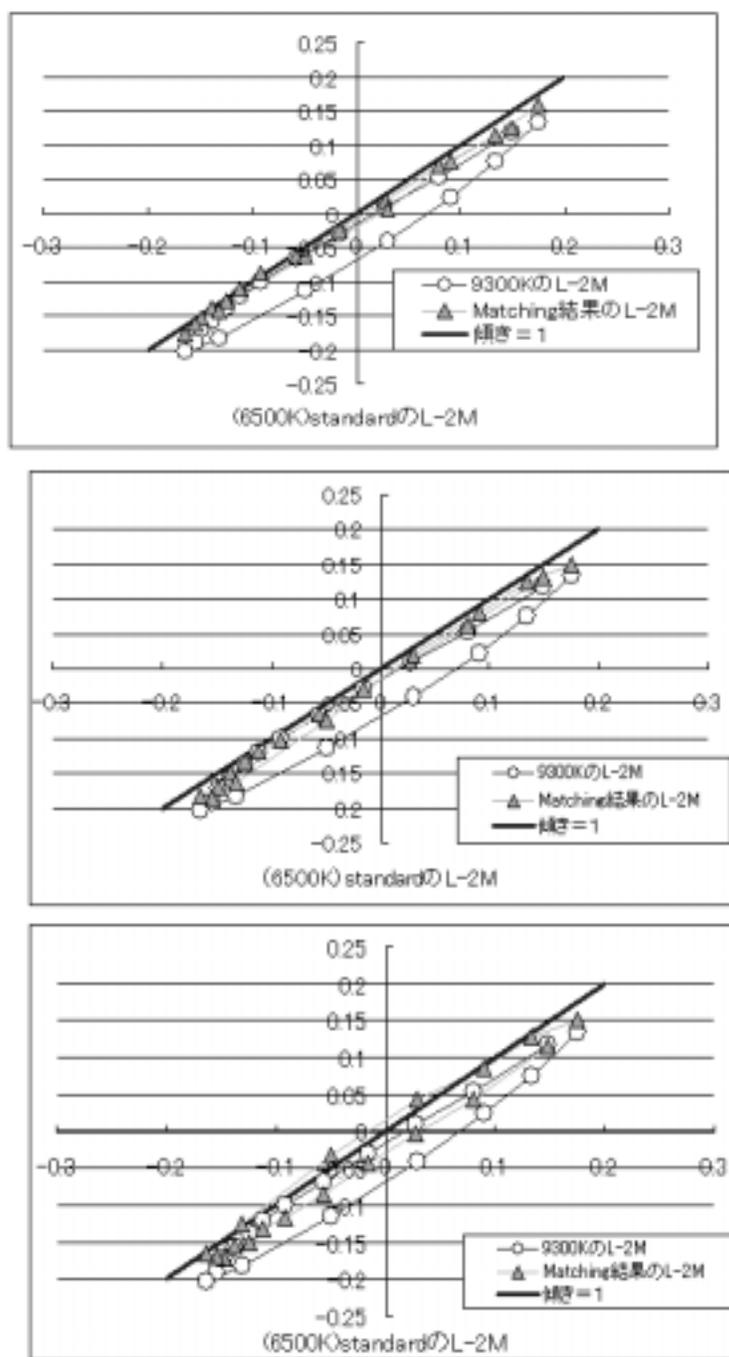


図 4.11 実験 1 (上), 実験 2 (真ん中), 実験 3 (下)

4.5 考察 2 のまとめ

4.5.1 ディスプレイの色温度

RGB 値において同じ色票が 6500K のディスプレイと 9300K のディスプレイとに呈示される場合の錐体応答量の関係をプロットしたところ、もちろん直線上には乗らない。これによりディスプレイの色温度調整は、人間の色恒常性とは関係のない(無意味ともいえる)調整であることがわかる。

S 錐体応答量の場合にはそれでも点は直線上に乗る程度のゆがみであるが、L-M の場合には点は大きく上下に分離している。したがってディスプレイの色温度を不用意に調整すると、ユーザ側(人間側)で色恒常性を行ったとしても、個々の認識された色の相互関係がゆがんでしまうと考えられる。

4.5.2 錐体順応量が変わると考えられる 3 つの刺激呈示条件による影響

L, M, S 錐体

錐体は 3 種類あり、それぞれ L, M, S 錐体(もしくは赤・緑・青錐体)と呼ばれる。L, M, S はそれぞれ long-, middle-, short- の頭文字で、L 錐体が 3 つの中でもっとも長い波長の光(赤側)に最大感度を持ち、S 錐体をもっとも短い波長の光(青側)に最大感度を持つ。M 錐体は L 錐体よりやや短波長側にピークをもつ波長である。

S 錐体応答の場合

結果は、ほぼ直線できれいにフィットできる。これは、錐体順応式で説明可能であるというを示している。このとき、傾きが 1 であるということは、もとの刺激と同じであるので、物理的に同じもの、つまり、色恒常性がないことを示している。逆に、傾きが 1 から離れるほど、色恒常性が強いことを示している。

錐体応答量の関係図から分かるように S 錐体の場合は、全ての実験において、傾きが 1 に

近いため、色恒常性の強さは点の並び（配置）からは必ずしも明確ではない。直線近似の傾きからは、両眼自由視がもっとも色恒常性が弱く（傾きが 1 に近い）、Haploscopic 呈示が最も強く（傾きが 1 より離れている）なっている。差が大きくなるのは 9300 K の方が青みが強いからである。シャッター短時間呈示での色恒常性の強さは両者の間になっている。

L-2M 錐体応答の場合

L-2M 錐体の場合は、グラフを見るとばらつきに差があり、色恒常性の強さは点の配置からも明らかである。もし色恒常性の効果が弱い場合には、9300K での物理的な錐体刺激量の点群のように上下に分離する。点配置からは、シャッター短時間呈示において最も色恒常性の効果がもっとも小さくなっており、Haploscopic 呈示、両眼自然視の順に、色恒常性が強くなっている。

また近似直線の傾きからは、シャッター短時間呈示や Haploscopic 呈示の色恒常性が弱く（傾きが 1 に近い）、両眼自然視の色恒常性が強い（傾きが 1 より離れている（小さい））なっている。またシャッター短時間呈示はおおよそその間になっている。差が小さくなるのは 9300K の方が赤みが弱いからである

刺激呈示条件と色恒常性の強さ

予想では色恒常性の強さは、

Haploscopic 呈示 両眼自然視 シャッター短時間呈示 と考えられた。

Haploscopic 呈示では、右と左の目がそれぞれのディスプレイの環境に対応することで、錐体順応が効率よく起こるのではないかと考えたからである。また、両眼自由視、短時間だけの刺激呈示のために錐体順応が極端に起こりにくいと考えられるので、シャッター短時間呈示が一番色恒常性が弱くなると考えた。

S 錐体応答にあらわれた順応（あるいは色恒常性）の強さは

Haploscopic 呈示 シャッター短時間呈示 両眼自然視 であった。

(L-2M) 錐体応答 にあらわれた順応 (あるいは色恒常性) の強さは

両眼自然視 Haplosopic 呈示 シャッター短時間呈示 であった。

実験結果より、錐体順応レベルを変化させた実験条件であっても、色恒常性はあまり変化しない。さらに、von Kries 型順応式から、S と L-2M 錐体より色恒常性の強さを検証したところ、色恒常性の強さと錐体順応レベルとは一致しないことが分かった。

第5章

結論

照明空間が与えられず、また錐体順応が起りやすいと考えられる Haploscopic 呈示やシャッターにより刺激呈示時間を短縮し、錐体順応が極端におこりにくいなどの方法を用いた。しかし、錐体や網膜順応が制御されているような視環境であっても、ある一定レベルの色恒常性が働いている。これはこのような呈示条件でも色恒常性が生じることを示す。ただし、その色恒常性の強さは、Haploscopic 呈示条件やシャッター短時間呈示条件のように錐体順応を（限定的であるにせよ）制限した場合には弱くなる。さらに、そのときの色恒常性の効果は単純な錐体順応式である von Kries 型順応式で表現することができる。

しかし、錐体順応レベルを変化させた実験条件であっても、色恒常性はあまり変化しない。また、色恒常性の強さは実験条件から考えられる錐体順応レベルとは一致しない。このことは、錐体や網膜レベルでの順応が制御されるような条件でも色恒常性の効果があり、錐体レベルでの順応だけではうまく結果を説明できないことが分かる。

ただし、実験条件によって変化させて錐体順応の強さと色恒常性の強さが一致しないことから、錐体順応だけで色恒常性が決まっているのではないことが分かる。つまり、色恒常性が von Kreis 型順応の式で説明されうるという事自体は、必ずしも、色恒常性が錐体や網膜レベルでの単純な順応効果により生じていることを意味するものではない。このことは、錐体や網膜レベルでの順応効果ではなく、照明認識視空間などの考えに代表される高次の働きも寄与していると考えられる。

謝辞

研究を進めるあたりご指導していただきました篠森先生には、学会参加についてや様々なアドバイスをいただき、大変前向きに取り組むことができました。ありがとうございました。自分自身も研究をやり遂げたことに驚いています。

また、被験者としてお手伝いしていただいた、水口智映子さん、菱山浩司さん、貴重な時間を割いていただきありがとうございました。感謝の気持ちでいっぱいです。

さらに、初めての日本視覚学会に参加した際には、篠森先生はもちろん、東野康幸さん、深田良尚さんには、いろいろなアドバイスをいただき、レベルの高い学会でも楽しく乗り切ることができました。このような学会に参加できたことを誇りに思います。大変貴重な体験です。

そして、共に研究してきた、賀来途直さん、桧垣陽平さん、長い道のりでしたが、お疲れ様でした。実験の際には、迷惑を掛けることも多々あったとは思いますが、学会などに共に参加し、協力しあって乗り越えたことは決して忘れません。

一方、福本先生、秋山由佳さんには精神面においてはかなり鍛えられました。ありがとうございました。前向きに取り組む精神は忘れません。

最後に、感謝してもしきれないほどお世話になりました平山正治さん。大変お忙しい中、時間を割いていただきました。学会参加の際には、見違えるほどの作品に仕上げることができました。論文執筆にあたって、いろいろなことを教えていただきました。心からお礼を申し上げます。本当に本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] 色の見えにおける CRT ディスプレイの色温度やカラーバランスの影響，清水泰智・篠森敬三，日本視覚学会誌 [VISION], Vol.14, No.1, pp.44, 2002
- [2] 色恒常性の神経計算理論，栗木一郎，光学 28 巻 5 号 (1999) pp.232-241
- [3] 日本情報処理ハンドブック，日本視覚学会編，栗木一郎
- [4] 日本情報処理ハンドブック，日本視覚学会編，矢口博久

付録 A

色覚検査について

A.1 色覚検査表

色覚検査表は、色覚異常者にとって混同されやすい色が使用されている。検査表の目的は、正常と異常をふるい分けることであるため、検査表による程度の判定は参考程度に捉えなければならない。本稿では色覚検査表に石原式 Plate とパネル D-15 テストを用いたが、国内で用いられる色覚検査表は他にも大熊表や標準色覚検査表がある。いずれの検査表も 100% の検出は不可能である。また、色弱、色盲、全盲の診断は検査表では不可能であることに注意しなければならない。

A.2 パネル D-15 テスト

先天色覚異常の程度を軽度と強度の 2 群に区分することを目的とした検査器である。1 個の基準色相 (reference cap) と、全色相から抽出された 15 個の検査色から構成されている。検査色の裏側には色相順に 1 から 15 までの番号が記されている。

検査は、全検査色を順不同に呈示し、基準の色相に類似の色から色相順に並べさせる。検査の結果は、検査用色相の裏側に示された番号を記録用紙に記載し、円形の色相環として示された色相番号を示す点を配列番号順に結ぶ。得られたパターンにより、色覚異常のタイプが判定される。

色覚検査表およびパネル D-15 テストともに、色票を用いたテストのため、使用する際には十分に気を配る必要がある。テストの際、色票部分に直接手を触れないように気をつけ、

使用後は速やかに暗所で保管しなければならない。これは皮脂や紫外線による色票の変色を避けるためである。

最も重要なことは、被験者のプライバシーを守ることである。そのため、色覚検査は実験者と被験者のみの隔離された部屋で行なわれるべきである。