

刺激対の時空間配置を考慮した  
色差式開発のための基礎的研究

平成6年9月

篠田 博之

# 目次

## 第1章 序論

1.1 色を扱うために.....	1
1.2 色差を扱うために.....	5
1.2.1 色差の重要性.....	5
1.2.2 色を離散的に扱う（大色差のための色カテゴリー研究）.....	5
1.2.3 色を連続量として扱う（小色差に適した均等色空間）.....	8
(i) 色弁別閾から均等色空間へ.....	8
(ii) CIE1976均等色空間.....	11
(iii) CIE1976色差式の問題点.....	13
1.3 本研究の目的.....	17

## 第2章 実験手法および装置

2.1 等色の繰り返し精度.....	19
2.1.1 原理.....	19
2.1.2 従来の方法.....	19
2.1.3 本研究で提案する方法.....	21
2.2 刺激提示装置.....	25
2.2.1 装置全体の構成.....	25
2.2.2 パーンハム色彩計の構造.....	27
2.2.3 パーンハム色彩計の校正および特性.....	31
(i) 装置座標系 (H, V, W) から色度と輝度 (x, y, Y) への変換.....	31
(ii) フィルタ移動量に対する色度点の変化.....	34
(iii) 色彩計の精度.....	35
(iv) 色彩計の正確度.....	37

## 第3章 等色の繰り返し精度における刺激間の空間ギャップの影響

3.1 実験1：自由等色における繰り返し精度.....	39
3.1.1 実験目的.....	39
3.1.2 実験.....	40
3.1.3 結果と考察.....	43
(i) 等色楕円体.....	43
(ii) 刺激間隔の関数としての等色楕円体.....	45
(iii) 刺激間隔6°と120°における等色楕円体.....	51
(iv) 隣接条件と大ギャップ条件での等色精度の比較.....	53
3.1.4 まとめ.....	53
3.2 実験2：低輝度刺激に対する等色の繰り返し精度.....	54
3.2.1 実験目的.....	54
3.2.2 実験.....	54
3.2.3 結果と考察.....	55
3.2.4 まとめ.....	59
3.3 実験3：制限時間内の等色における繰り返し精度.....	60
3.3.1 実験目的.....	60
3.3.2 実験.....	60
3.3.3 結果と考察.....	63
3.3.4 まとめ.....	67

第4章 等色作業中の視点の動き	
4.1 実験目的	68
4.2 実験	68
4.3 結果と考察	70
4.3.1 等色値のばらつき	70
4.3.2 等色にかかる時間と観察回数	72
4.3.3 視点の動きの解析	74
4.3.4 等色精度との相関	89
4.4 まとめ	90
第5章 等色精度における刺激間の時間ギャップの影響	
5.1 実験目的	91
5.2 実験	91
5.3 結果	93
5.3.1 95%等色楕円体	93
5.3.2 等色中心位置	98
5.3.3 等色楕円体の大きさ	100
5.4 考察	101
5.4.1 等色中心位置に関して	101
5.4.2 等色の繰り返し精度に関して	102
5.5 まとめ	103
第6章 総合考察	
6.1 空間的に離れた刺激の色弁別における視点移動時間の影響	104
6.2 空間的に離れた刺激の色弁別における周辺視野情報の影響	105
6.3 刺激対の時空間的ギャップを考慮した色差式中の補正係数の提案	109
6.4 色弁別メカニズム	110
6.4.1 色知覚機構と色比較機構	110
6.4.2 比較レベルに依存する色弁別能力	110
6.5 本研究の応用	112
6.6 おわりに	113
第7章 結論	
結論	114
発表論文および口頭発表	116
謝辞	117
参考文献	118

## 第1章 序論

### 1.1 色を扱うために\*

今日ではデザインに加え「色」自体が商品の売れ行きを左右する重要な付加価値となっており、積極的に色を活用した魅力ある商品づくりが求められている。また現代のような大量生産、大量消費の時代にあっては均一な製品を生産、流通させることが要求されている。その要求を満たすために、農産物の収穫時期の判定（図1-1）から工業製品の品質管理（Patee, Giesbrecht, and Young 1991）に至るまで「色」は製品の状態を知る有効な手段として広く活用されている。このように様々な産業界で、色彩の有効利用に対する関心が高まっており、色彩工学や色彩科学の重要性があらためて強調されている。建築業界も例外ではない。設計に限らず、都市計画、景観保全、室内ではオフィス環境および住環境の設計、整備・・・等々、色の問題を扱わずに済むことはあり得ないと言ってもよい。

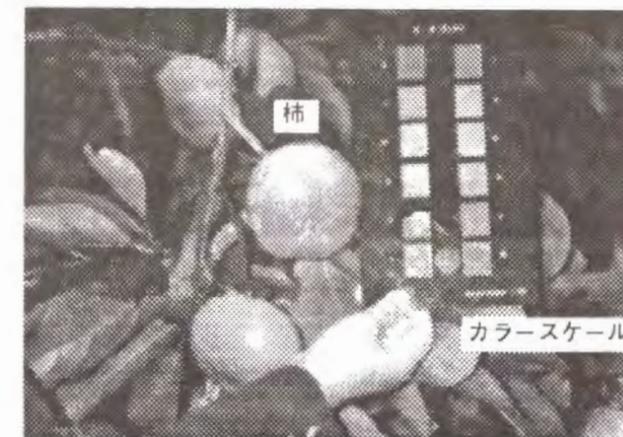


図1-1 カラースケールを用いた柿の適期収穫（三重県多気郡 前川次郎柿）

色を扱うためには、色を客観的かつ定量的に表現する尺度がまず第一に必要なものである。色は長さや重さと同じように数値で扱うことができるのだろうか。「色」とは一体何なのか。我々は数えきれないほどの色彩の恵みを享受している。我々の周りの、すべての物が色をもって存在している。「赤い林檎、白い雪、緑色の葉」、このように言うときの色は物の属性を指している。また色は短波長の紫から長波長の赤にいたるまで光（電磁波）の波長で説明されることもある。その一方で「色覚異常者と呼ばれる人々には色は見えない」、「犬や牛は色が見えない」などと言い、「実際には（物理的には）色というものが存在しているのにそれを知る手だてがない」かのような表現をする。

\*1.1の参考文献として、池田光男：色彩工学の基礎，朝倉出版，東京（1980）

色は知覚量である。つまり、観察される物と観察する者があって初めて成立するものなのである。光（照明光あるいは光源）と物体と観測者、あるいは光と観測者の関係の上に存在するものなのである（図1-2）。波長で説明される色は、その「光」自体の分光特性を述べているのであり、物の属性としての色は、その「物」の分光反射特性または分光透過特性に対応している。また観測者によって見えたり見えなかったり、見える色が異なったりするのは「観測者」の持っている分光感度特性の違いに起因している。

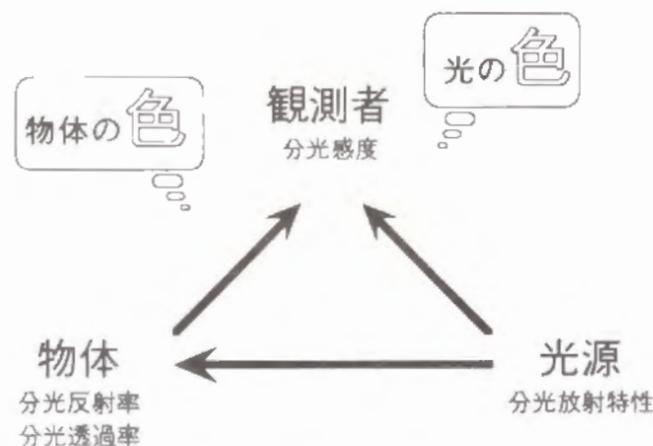


図1-2 色知覚の成立。

すべての色は三原色の混ぜ合わせで作ることができること、また色は明度（明るさ）、彩度、色相の3つの性質を持っていることを思い出すと、色が3次元の知覚量であることが分かる。CIE（国際照明委員会）では1931年に等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ を用いて(1-1)式により定義されるX、Y、Zの3つの値（三刺激値）で色を表現する単位体系CIE1931XYZ表色系を確立した。

$$\begin{aligned} X &= k \int P_{\lambda} \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot d\lambda \\ Y &= k \int P_{\lambda} \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda \\ Z &= k \int P_{\lambda} \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda \end{aligned} \quad (1-1)$$

ただし、 $P_{\lambda}d\lambda$ は分光放射束である。 $\bar{y}(\lambda)$ を標準比視感度 $V(\lambda)$ に等しくとってYを明るさに対応させているのが特徴である。 $P_{\lambda}d\lambda$ がワット[W]の単位で与えられているときkを最大視感度 $K_m$ 、つまり683[lm/W]とすればYの値は光束（luminous flux）[lm]になる。また $P_{\lambda}d\lambda$ を分光放射輝度[W/m<sup>2</sup>sr]、kを $K_m$ とすればYの値は輝度[cd/m<sup>2</sup>]になる。

光源からの光が色フィルタを透過してできる色の場合、 $P_{\lambda}$ は光源の分光放射束 $H_{\lambda}$ とフィルタの分光透過率 $\tau_{\lambda}$ の積によって与えられる。同様に、物体表面で反射して見える色の場合は、 $\tau_{\lambda}$ の代わりに物体の分光反射率 $\rho_{\lambda}$ または分光リフレクタンス・ファクタ $\beta_{\lambda}$ を用いればよい。特に反射物体の場合は完全拡散反射面（反射角の方向、波長によらず反射率が1となる面）を基準にして

$$k = \frac{100}{\int H_{\lambda} \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (1-2)$$

と定義し、物体の明度に関係させている。ちなみにこのときのYはルミナンス・ファクターと呼ばれている。

この表色系ではどの色(X, Y, Z)も原点からのベクトルで表わせ、多色の加法混色がそのベクトル和で表わせる。したがって光の色の混色を扱うのに適した表色系になっている。ベクトルの長さがその色の強度を表わしており、明るさ以外の色属性はベクトルの方向で表わされる。そこで、式(1-3)により色度座標x、y、zなるものを定義し、明るさ以外の色の変化を記述することにした。これにより色度座標(x, y)と輝度Y[cd/m<sup>2</sup>]ですべての色を特定できるようになった。

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} = 1 - x - y \end{aligned} \quad (1-3)$$

図1-3に等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ とCIE1931xy色度図を示す。色度図上の実線はスペクトル軌跡を表している。

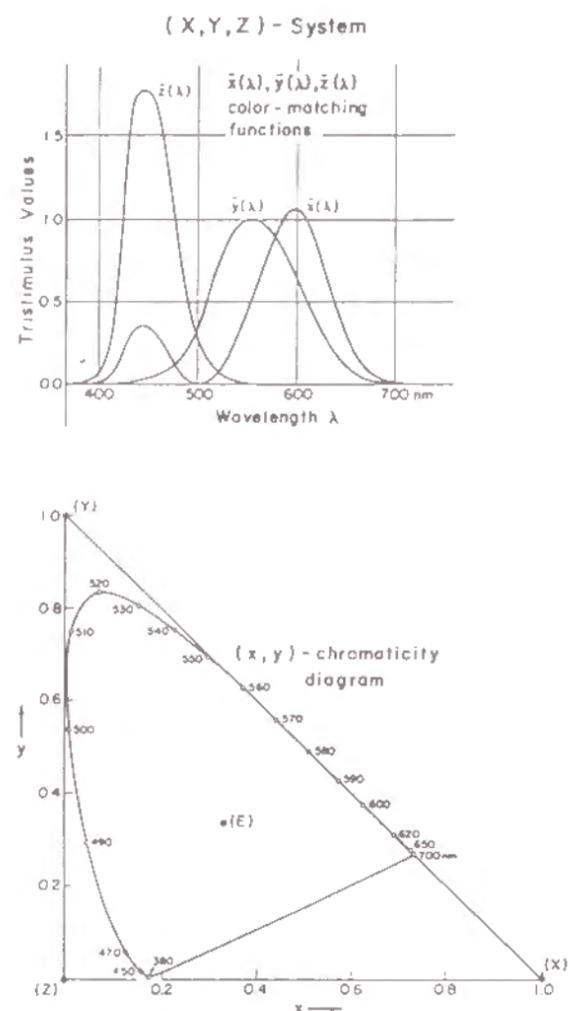


図1-3 CIE1931表色系。等色関数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ とxy色度座標。

## 1.2 色差を扱うために

### 1.2.1 色差の重要性

CIE1931XYZ表色系の確立によって、色を定量的かつ客観的に記述することが可能になった。原理的にはこのXYZに沿って色を扱えば、正確に色をコントロールできるはずである。しかし現実的には、思い通りの色を再現することは難しく、常にある程度の不確定さが伴う。特に異なった材料、異なった方法で作られた色を等しくすることは非常に難しい。ほとんどの商品は、製造あるいは流通の過程において厳しく色彩管理されている。どの産業においても製品の色彩を高水準に管理することは極めて重要な技術課題となっている（Balinkin 1939、Park and Thompson 1981、Clarke, McDonald and Rigg 1984、Jay 1991）。

また今日ではカラーモニタやカラープリンタ等のハード面での技術革新、CGやCADなどのグラフィックソフトの普及によって、オフィス作業環境のカラー化が急速に進んでいる。色の専門家でない一般の人が、様々なメディアを用いて日常的に色を扱わねばならない時代に突入している。そうした状況の中で、多くの人が異種メディアにまたがる色彩コントロールの難しさを実感している。カラーCRTではRGB（red、green、blue）値、印刷物ではCMYK（cyan、magenta、yellow、black）値というように、メディアによって色再現、色記述方法が異なること、さらに色再現範囲や見えのモードの違いも加わってメディアに依存しない色再現は容易ではない。ここでも色彩管理技術が重要な役割を果たす。

色彩管理で要求される課題は求めている色と同じかどうか（色弁別）、違うとしたらどの位の差なのか（色差の計算）、その差は許容されるのかそれとも色を修正する必要があるのかの判定（許容範囲との比較）である。このように色を実際に扱うには色差の取り扱いが不可避である。加法混色に適したXYZ表色系も色差の扱いに関しては優れた表色系とは言えない。したがって色差を扱うのに適した色の尺度を確立することが、色差研究の応用面での最終目的と言える。色差研究としては、ミクロに向かうかマクロに向かうかで大きく分けて2つの方向がある。続く1.2.2でマクロな方向、つまり著者が過去に行った大色差に関連する研究について述べる。そして1.2.3でミクロの方向、つまり一般的に言う色差や色弁別の研究、さらに均等色空間や色差式の変遷および現状について述べた後、1.3の本研究の目的に続けたいと思う。

### 1.2.2 色を離散的に扱う（大色差のための色カテゴリー研究）

色の三属性である色相、明度、彩度（色み量）は連続的な色の属性として用いられる。また先述のCIE1931XYZ表色系にしても色を3次元の連続量として扱っ

ている。人間の見ることのできる色の数を、色弁別閾を基にして計算すると、実に100万個以上にもなる。まさしく、無数の色に囲まれて我々は生活しているのである。しかし日常でそれだけの色を扱っているかと言うとそうでもない。色情報のやり取りには「黄色、明るい青、薄い黄緑」のように、「色名」、もしくは「形容詞+色名」で殆どが事足りる。もっと厳密に伝えたいときになって初めて実物（色見本やサンプル）を持ち出すことになる。ましてCIEのXYZ、マンセル、NCS等の表色系を介して色情報をやり取りしている（できる）のは一部の専門家だけである。

この日常何気なく行なっている、「色名を用いる」という行為には、連続的な色の見えのどこかに境界を設け、領域を分割するという作業が伴う。例えば、薄い青、明るい青、緑みがかかった青等、様々な見えの色をひとまとめにして“青”と表現しているのである。視覚系でのこの色情報処理を「色のカテゴリー化」、「色のカテゴリーカル処理」と呼び、色彩科学や色彩工学の重要な研究分野の一つになっている。

Munsell表色系のHue（色相）、Chroma（色み量）、Value（明度）といった各々の属性は均等間隔尺度になっている。そのため、均等色度図や均等色空間の均一性を確かめる目安として、Munsell表色系をその色度図上にプロットするということがよく行なわれる。これは中程度の色差の均一性を調べるのに適した方法である。しかし、異なるカテゴリーにまたがる2色間のような大きな色差、例えば赤と青の間の色差のような場合には、色カテゴリーに基づいて色差を捉えるべきである。というのは、カテゴリーによる領域分割は必ずしも色弁別閾値やMunsell表色系の間隔とは必ずしも相関していないからである。具体的に言うと、既存の均等色空間やMunsell色空間内に、カテゴリーとそのFocal color（その色名を最も良く代表する色、中心色）をプロットした場合、カテゴリーによってその大きさが異なるだけでなく、Focal colorも必ずしもカテゴリーの中心には位置していないのである。もはや小あるいは中色差の概念の延長は通用しない。小色差、中色差では連続的かつ量的に扱うことのできた色差が、ここでは質的な違いになっているのである。したがって色カテゴリーの大きさが均等で、かつFocal colorが各々の中心に位置するような色空間は、大色差を扱うための均等色空間開発の一つの指針になると思われる。

以前、開口色モード（発光しているように見える色）と表面色モード（物体表面として見える色）について、3次元色空間を11色のカテゴリーで領域分割した（Shinoda, Uchikawa, and Ikeda 1993、内川・栗木・篠田 1993、内川・栗木・篠田 1994）。このときの色空間はxyY色空間、つまりCIE1931xy色度図に輝度軸Yが直交する色空間で、用いた11の色名は赤、青、黄、緑、紫、桃、橙、茶、白、黒、灰である。この11色名は基本色名と呼ばれ、言語、個人、対象物によらない普遍的な色名である（Berlin and Kay 1969）。結果は開口色と表面色での構造的な違いを示した。光源色では図1-4のように輝度軸と平行に柱状に分割されていた。つまり、カテゴリーは輝度によらず色度だけに依存

していた。しかし物体色では同じ色度でも輝度によってカテゴリーが異なることがあり、図1-5のように分割されていることが分かった。また、茶や黒は表面色特有の色であり、光源色では黄、橙、桃の輝度が下がっても単に暗い黄、橙、桃と知覚され、カテゴリーは変わらないのに対し、表面色では茶や紫という異なったカテゴリーに属することが示された。さらに色度や輝度が同じでも見えのモードによって色名が異なる場合があること明らかになった。

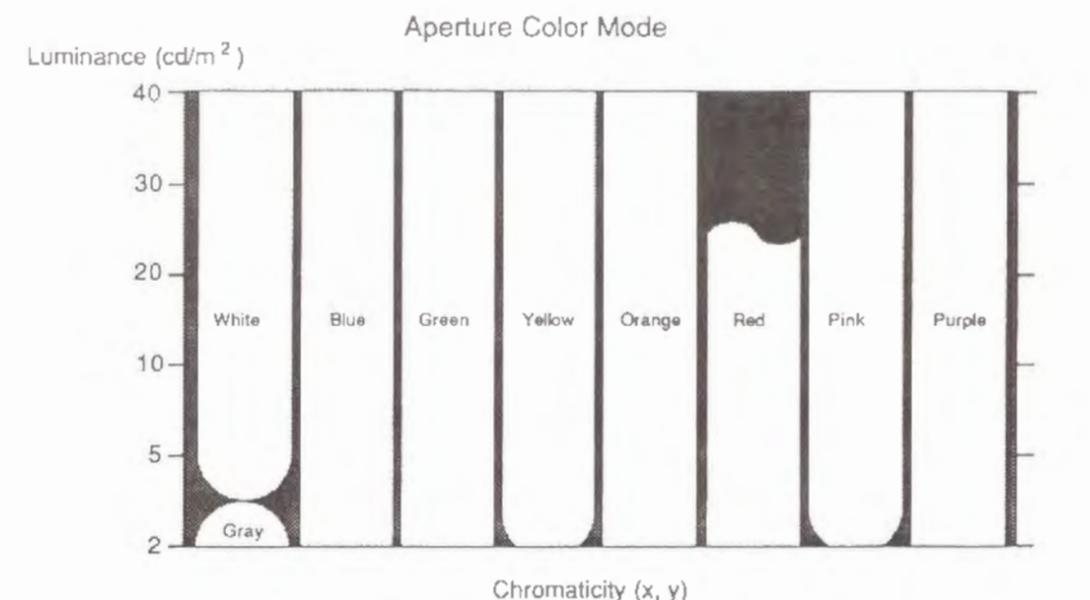


図1-4 開口色モードでの色名領域分割（Shinoda, Uchikawa, and Ikeda 1993）。

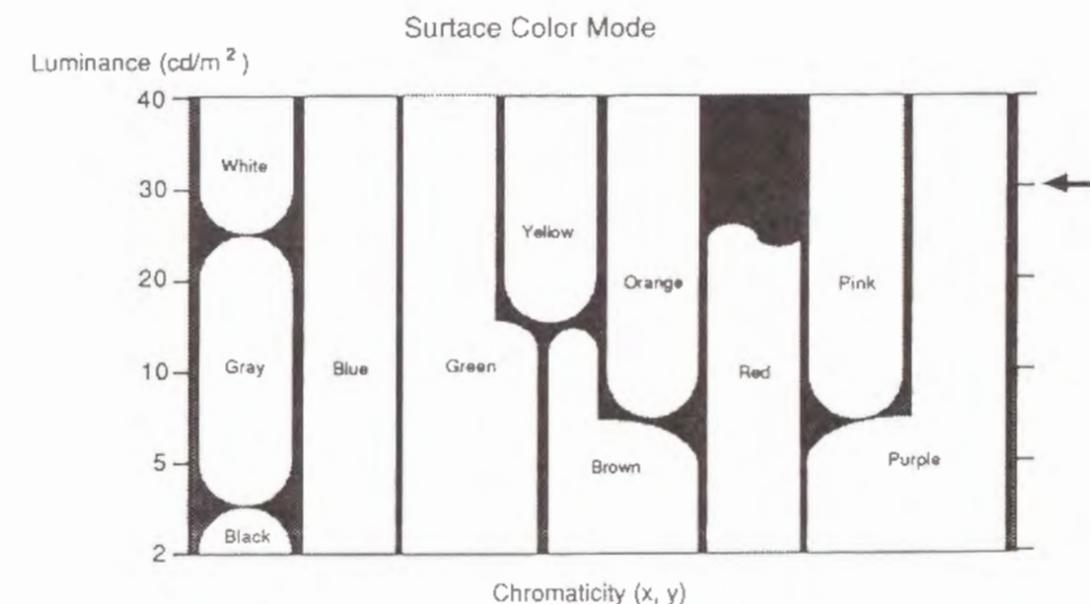


図1-5 表面色モードでの色名領域分割（Shinoda, Uchikawa, and Ikeda 1993）。

色の記憶実験 (Uchikawa and Shinoda 1990) からは、長期の色記憶では弁別閾値に基づく色差ではなく、色カテゴリーの影響が強く現れることが示された。これは色情報を長期的に保持するときには、色名による情報の圧縮や抽出が行なわれていることを示すものである。

信号、交通標識、地下鉄やバスなどの路線図、大規模な駐車場での区画分け、集合住宅での区画や棟の区別等、色を指標として用いたり、色コードとして情報伝達的手段にすることがある。コードや指標として用いられる色は様々な環境で、誰にでも共通に知覚、認識される必要がある。また記憶している色と同じ色のコードを短時間で探索しなければならないこともある。どのような色色コードとして採用するかは重要な問題であるが、適切な色の選択や色数の制限は細かい色の変化を許容した色の分類、すなわち色カテゴリーに基づく大色差の観点からの検討が必要である。とりわけ照度レベル (Middleton and Mayo 1952) や色の見えのモード (Shinoda, Uchikawa, and Ikeda 1993) 等の環境変化と色カテゴリーの関係を考慮しておくことが大切である。

### 1.2.3 色を連続量として扱う (小色差に適した均等色空間)\*

#### (i) 色弁別閾から均等色空間へ

尺度には分類機能だけの名義尺度、それに順序づけ機能を加えた順序尺度、目盛を等間隔にして足算や引算ができるようにした間隔尺度、さらに絶対原点を設けて掛け算や割り算に意味を持たせた比率尺度の4種類がある。色を離散的に扱う場合には名義尺度、順序尺度でよいが、連続的に扱うには間隔尺度あるいは比率尺度が必要である。大きな色差には離散的な色カテゴリーが有用であることを1.2.2で述べた。しかし小さな色差は色弁別閾で規定するのが一般的である。すなわち色弁別閾値や見分けられる最小の色差 (just noticeable difference, JND) を間隔尺度や比率尺度の1単位にとって連続的に色差を表わすのである。

色差式および均等色空間の開発研究は1940頃から盛んに行なわれるようになった。MacAdam(1942)は、参照光 $C_R$ と等色光 $C_T$ を二分視野で観測し (図1-6)  $C_T$ を $C_R$ に何回も繰り返し等色するときの標準偏差を色弁別閾の指標としている。刺激の輝度は一定にしているため、標準偏差をCIE1931xy色度図上にプロットすると楕円で近似でき、図1-7のようになる。楕円は標準偏差の値を10倍にして表示している。楕円の大きさや方向は色度図上の位置によって著しく異なっており、CIE1931xy色度図の不均一性を示している。理論的には、これらの楕円が大きさの等しい円になるように色度図を修正すれば、均等色度図 (uniform chromaticity scale diagram, UCS diagram) ができる。

\*1.2.3の参考文献として、池田光男：色彩工学の基礎，朝倉出版，東京（1980）、小松原仁：色差式の開発動向，照明学会誌，76-9，pp.496-499（1992）

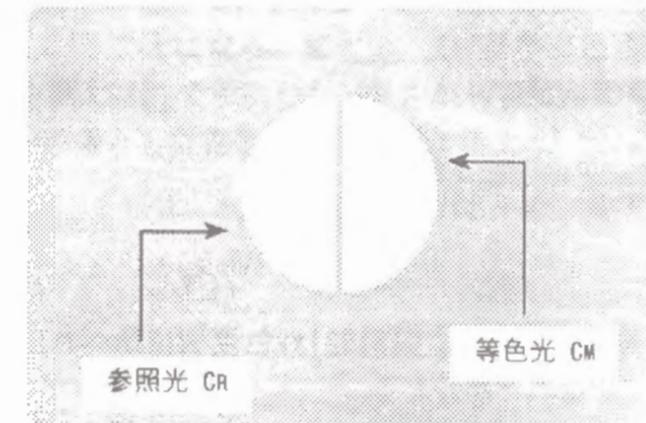


図1-6 二分視野での等色。

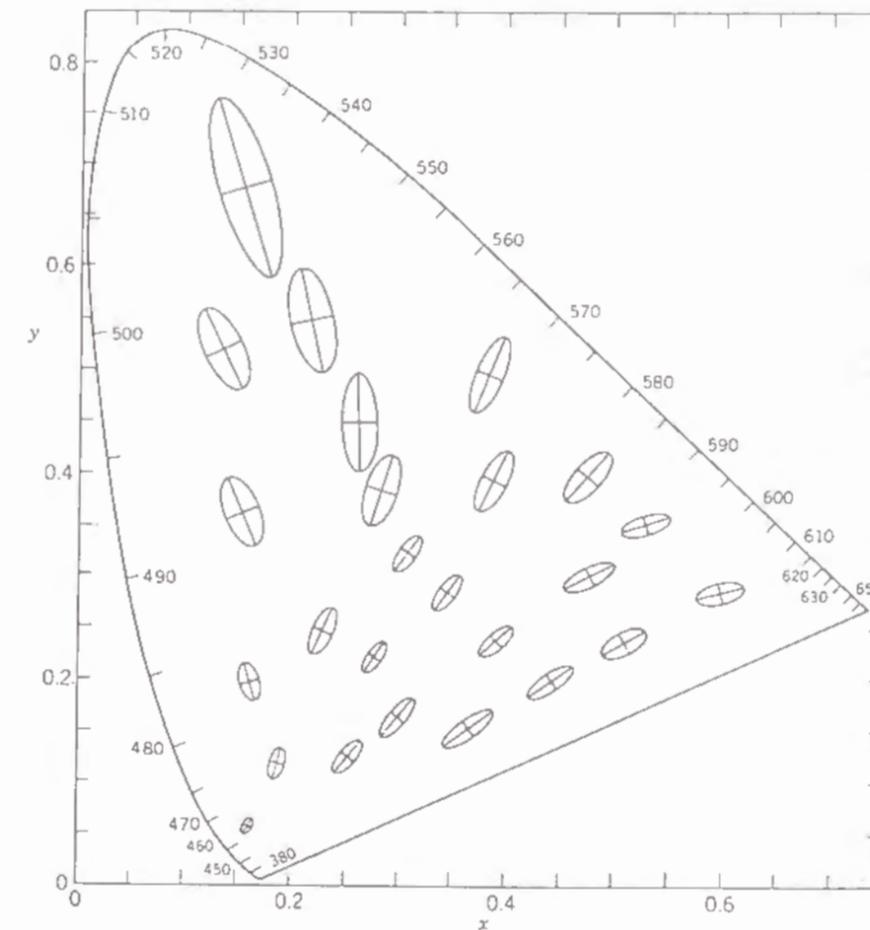


図1-7 CIE1931色度図の不均一性を示すMacAdam(1942)の色弁別楕円。

Judd(1935)、MacAdam(1937)、Breckenridge and Schaub(1939)、Farnsworth(1944)、Hunter(1941)、杉山・福田(1959)と、多くのUCS色度図が提案されていたが、1960年にCIEではxy色度座標からの変換式が簡単なMacAdamのものを採用し、CIE1960UCS色度図とした。新しい座標u、vは式(1-4)で表わされる。

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z}$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} = \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (1-4)$$

図1-8に図1-7の楕円を描き直した。CIE1931xy色度図に比べれば楕円の大きさはかなり均一になっていることが分かる。

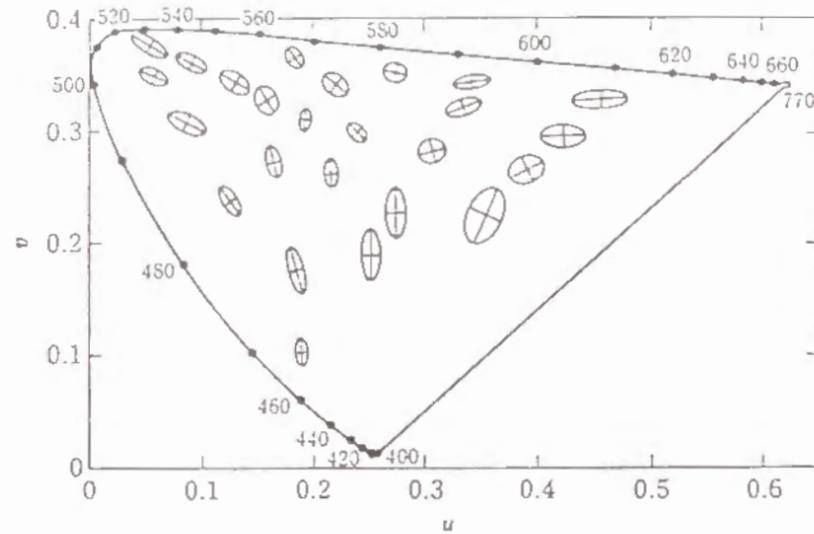


図1-8 CIE1960UCS色度図上にプロットしたMacAdam(1942)の色弁別楕円。池田(1980)より引用。

uv色度図により、等しい明るさの色の色差は色度図上の幾何学的距離で求められることになった。さらに明るさ方向の尺度を導入すれば3次元の均等色空間が確立できる。そこでCIEは1964年にWyszeckiの提案した明るさの心理尺度を導入し、(1-5)式で定義されるCIE1964U\*V\*W\*均等色空間を勧告した。

$$U^* = 13W^*(u - u_0)$$

$$V^* = 13W^*(v - v_0) \quad (1-5)$$

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17 \quad \text{ただし}(1 \leq Y \leq 100)$$

ここでYは(1-2)式を(1-1)式に代入して得られるルミナンス・ファクター

である。したがってこの色空間は物体色あるいは表面色の刺激に対して定義された均等色空間ということになる。また $u_0$ 、 $v_0$ は基準白色面の $u$ 、 $v$ 値であり、完全拡散反射面を例えば $D_{95}$ で照明したときの $u$ 、 $v$ 値で与えられる。この $U^*V^*W^*$ 空間での幾何学的距離として色差 $\Delta E$ が定義できる(1-6)式)。

$$\Delta E = [(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2]^{1/2} \quad (1-6)$$

### (ii) CIE1976均等色空間

このように、CIEは $U^*V^*W^*$ 均等色空間を勧告したものの、現場での普及率は低く、また目視との不一致も指摘されていた。そこでMunsell表色系と対応するように作られたAdams-Nickersonの均等色空間(Nickerson *et al.* 1944)を基に、Munsell valueを立方根の明度関数で置き換えてCIE1976L\*a\*b\* (または呼び名をCIELAB)として新たに採用することにした。しかし一方では、xy色度座標の射影変換で得られるuv色度図は光の混色を扱うのに適しているとの意見も強く、CIE1960U\*V\*W\*を修正してCIE1976L\*u\*v\* (またはCIELUV)として残した。結局CIEはCIELUVとCIELABの二つを同時に採用することになった。

2つの均等色空間の定義式を以下に示す。ただしCIE1964U\*V\*W\*のときと同様、Yはルミナンス・ファクター、 $X_0$ 、 $Y_0$ 、 $Z_0$ 、 $u_0'$ 、 $v_0'$ は基準白色面の $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 、 $u'$ 、 $v'$ である。この色空間も物体色あるいは表面色の刺激に対して定義された均等色空間である。明るさの尺度が確定されていないため、開口色、光源色の均等色空間はまだ定義されていない。

- CIELAB -

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/3} - 16 \quad \left(\frac{Y}{Y_0} > 0.008856\right)$$

$$a^* = 500 \left[ \left(\frac{X}{X_0}\right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/3} \right]$$

$$b^* = 200 \left[ \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_0}\right)^{1/3} \right]$$

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (1-8)$$

- CIELUV -

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/3} - 16 \quad \left(\frac{Y}{Y_0} > 0.008856\right)$$

$$u^* = 13L^*(u' - u_0') \quad (1-9)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v_0')$$

$$\text{ただし } u' = u, v' = \frac{9}{6} v \quad (1-10)$$

$$\Delta E_{uv}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2} \quad (1-11)$$

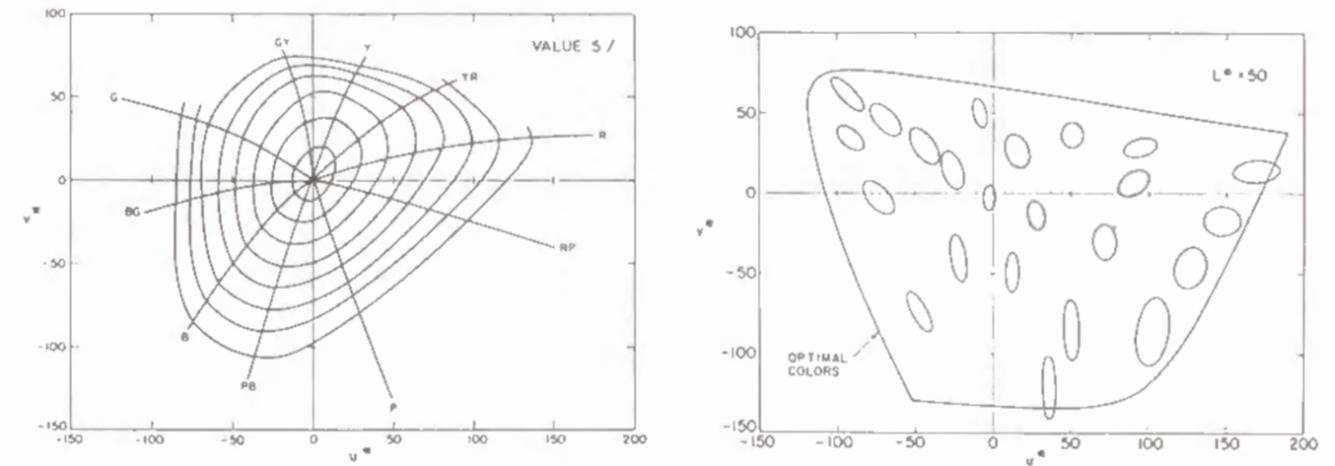


図1-10 CIE1976u\*v\*色度座標上の等クロマ、等ヒューのマンセル色票 (a) と MacAdam(1942)の色弁別楕円 (b)。Robertson(1977)より引用。

(iii) CIE1976色差式の問題点

しかし、上の2つの色差式でも視感色差との一致が完全ではなく、1976年のCIE勧告以後も続けて均等色空間、色差式の研究が行なわれている。CIE均等色空間の問題点は大きく分けて2つある。一つは(A) 色空間自体の不均一性、つまり座標位置や方向によって色差が異なる、あるいは色度差と明度差の重みづけが不適當であるという問題。もう一つは色差判定や色弁別をするときの(B) 刺激条件、観察条件の影響である。前者に関してはCIEのTC1-29 (Industrial Color-Difference Evaluation, Alman 1993) が産業界における色差評価の標準化のために、様々な色差式の性能比較および修正を行ない、新たなCIE式の勧告に向けて活動している。後者に関してはTC1-28 (Parameters Affecting Colour-Difference Evaluation, Witt 1992) が標準的な観察環境から外れる場合の補正方法を検討している。

1976年のCIELAB、CIELUVの採用に伴って以下に示す心理メトリック量が導入された。

(1) metric lightness (明度と相関ある量、L'で定義)

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_0}\right)^{1/3} - 16 \quad \left(\frac{Y}{Y_0} > 0.008856\right) \quad (1-13)$$

図1-9と1-10では色空間の均等性を見るために、マンセル色票およびMacAdamの色弁別楕円をCIE1976a\*b\*座標、CIE1976u\*v\*座標上にプロットした。(a)にはバリューV=5のマンセル色票の等クロマおよび等ヒューの線を、(b)にはL\*=50と仮定してMacAdam(1942)の楕円を描いた。ただし(b)での外側の線は物体色の存在限界を示している。明らかに、MacAdamの楕円に関してはu\*v\*色度図の方が均等性が高く、マンセルに関してはa\*b\*色度図の方が歪みは小さい。

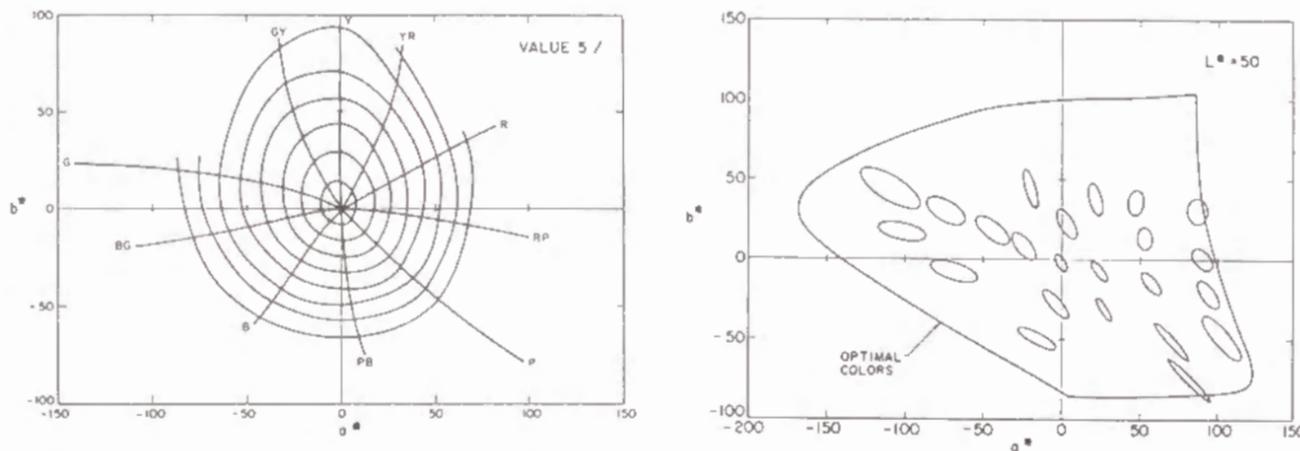


図1-9 CIE1976a\*b\*色度座標上の等クロマ、等ヒューのマンセル色票 (a) と MacAdam(1942)の色弁別楕円 (b)。Robertson(1977)より引用。

(2) metric chroma (彩度に関連する量、 $C_{ab}^*$ 、 $C_{uv}^*$ で定義)

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})$$

$$C_{uv}^* = (u^{*2} + v^{*2}) \quad (1-14)$$

(3) metric hue-angle (色相に関連する量、 $H_{ab}^\circ$ 、 $H_{uv}^\circ$ で定義)

$$H_{ab}^\circ = \tan^{-1} \left( \frac{a^*}{b^*} \right)$$

$$H_{uv}^\circ = \tan^{-1} \left( \frac{u^*}{v^*} \right) \quad (1-15)$$

(4) metric hue-difference (色相差に関連する量、 $\Delta H_{ab}^*$ 、 $\Delta H_{uv}^*$ で定義)

$$\Delta H_{ab}^* = \left[ (\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L_{ab}^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2 \right]^{1/2}$$

$$\Delta H_{uv}^* = \left[ (\Delta E_{uv}^*)^2 - (\Delta L_{uv}^*)^2 - (\Delta C_{uv}^*)^2 \right]^{1/2} \quad (1-16)$$

CIEのTC1-29ではこれらの心理メトリック量を用いてCIELAB色差式を修正し、(1-17)式を一般式として提案している。

$$\Delta E_{Ch}^* = \left[ \left( \frac{\Delta L^*}{k_L \cdot S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C^*}{k_C \cdot S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H^*}{k_H \cdot S_H} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1-17)$$

この式において、補正係数 (parametric factor)  $k_L$ 、 $k_C$ 、 $k_H$ で標準的な観察条件から外れる場合の補正を行ない、重み付け係数 (weighting factor)  $S_L$ 、 $S_C$ 、 $S_H$ で、各メトリック心理量の重み付けを行う。TC1-29では重み付け係数を次式のようにchroma、 $C_{ab}^*$ の一次関数にとるように提案している。

$$S_L = 1.0$$

$$S_C = 1.0 + 0.045 \cdot C_{ab}^* \quad (1-18)$$

$$S_H = 1.0 + 0.015 \cdot C_{ab}^*$$

またここでTC1-29の想定している標準観察条件は以下の通りである。

照明	: $D_{65}$
照度	: 1000 lx
周辺刺激	: 灰色、neutral gray with $L^* = 50$
モード	: 物体色モード
刺激の大きさ	: $4^\circ$ 以上
刺激対の間隔	: 隣接、hair line
表面、テクスチャー	: 一様

標準条件からはずれる場合の補正に関してTC1-28は、今までの研究を基に(1-16)式の $k_L$ 、 $k_C$ 、 $k_H$ 、(1-18)式の $k_E$ 、あるいは(1-19)式の $k_L$ 、 $k_{ab}$ 等のparametric factorの値を具体的に幾つかの条件に対して提示している。以下にそれらを列挙する。ただし(1-18)式、(1-19)式において $\Delta E^*$ は基準となる条件での色差、 $\Delta E^*$ は修正後の色差を表し、重み付け係数は省略している。

$$\Delta E^* = \frac{\Delta E^*}{k_E} \quad (1-18)$$

$$= \left[ \left( \frac{\Delta L^*}{k_L} \right)^2 + \frac{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}{k_{ab}^2} \right]^{1/2} \quad (1-19)$$

刺激の大きさ

大きさ $10^\circ$ を基準としたときの、 $2^\circ$ での色差における補正係数。

$$k_{ab} = 2.0 \quad (\text{背景が白のとき}) \quad (1-20)$$

$$k_{ab} = 1.4 \quad (\text{背景が黒のとき}) \quad (1-21)$$

$$k_L = 1.0 \quad (\text{すべての場合で}) \quad (1-22)$$

刺激対の間隔

隣接 (hair line、極細い境界線) 条件を基準とするときの、ギャップ $0.5^\circ$ 以上で得られる色差の補正係数。

$$k_E = 2.6 \quad (\text{低い明度、} L^* \leq 40) \quad (1-23)$$

$$k_E = 2.0 \quad (\text{中位の明度、} 40 \leq L^* \leq 60) \quad (1-24)$$

$$k_E = 1.6 \quad (\text{高い明度、} 60 \leq L^*) \quad (1-25)$$

## 周辺の色

[刺激が小さい場合]

背景と刺激の色が同系色の条件を基準とするときの、背景色と刺激色が大きく異なる条件で得られる色差の補正。

$$k_{ab} \leq 2.6 \quad (1-26)$$

$$k_L = 1.0 \quad (1-27)$$

[刺激が大きい場合]

背景と刺激の明度がほぼ等しい条件を基準としたときの、背景明度が刺激と異なる条件（コントラスト2：1程度）で得られる色差の補正係数。

$$k_E = 1.4 \quad (\text{刺激明度 } L_{i0}^* < 36) \quad (1-28)$$

$$k_E = 1.0 \quad (\text{刺激明度 } L_{i0}^* > 45) \quad (1-29)$$

## 刺激輝度

刺激輝度100cd/m<sup>2</sup>を基準とするときの、1000cd/m<sup>2</sup>での色差の補正。

$$k_E = 0.7 \quad (1-30)$$

## 1.3 本研究の目的

1.1では多くの産業界で「色彩」を扱う技術が必要とされていることを述べた。また1.2では特に、色再現の段階では「色差」の取り扱いが不可欠であり、そのための均等色空間や色差式が提供され、すでに実用化されていることを述べた。色弁別能力や色差の知覚は対象物の呈示条件や観察条件に大きく依存している。そのためにCIE色差式でも補正係数を導入し、条件に合わせて修正するという手法を提案している。では通常、我々はどうのような状況で複数の色を比較しているのだろうか。小さい物なら手に取って、突き合わせて比較することができる。これは実験条件でいうところの二分視野に相当し、このときの弁別能力が最も高い。しかしいつもそう出来るとは限らない。置かれたままの、あるがままの状態を観察する方が多い。つまり通常は、比較する対象物の間には空間的なギャップが存在しているのである。ときとして、同一視野に収まらないことさえある。当然、網膜中心窩から外れていれば、眼球や頭部を回転させて視点を移動し、継時的に観察することになる（図1-11）。

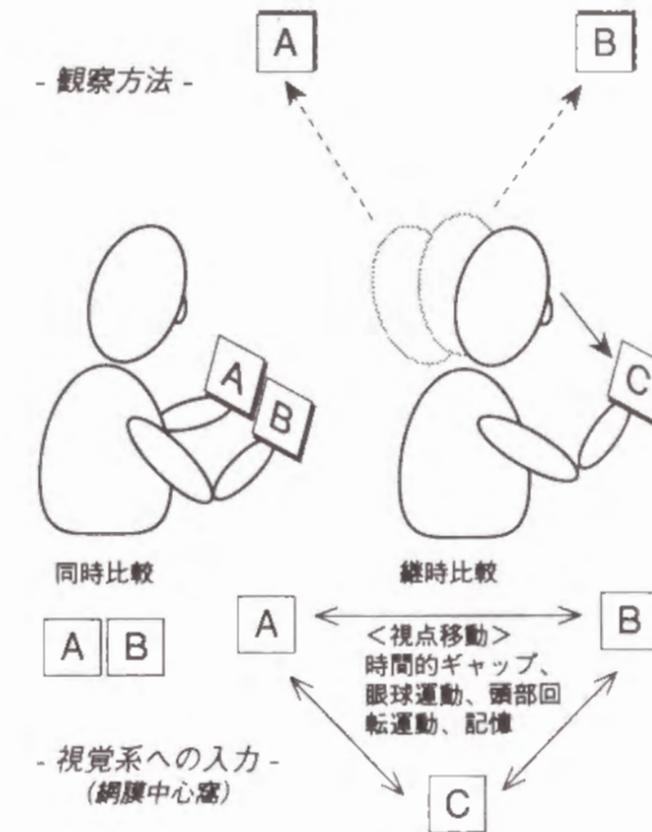


図1-11 色弁別作業での観察条件の違い。

「この時の色弁別能力はどの程度なのだろうか、また、補正係数の値はどのように設定したらよいのだろうか。」過去の研究が示すように、刺激間の空間的ギャップは確かに弁別能の低下を招く。そのため色差式中の補正係数を1以上にして視感色差に近づけようとしている。しかし、過去の実験で採用している刺激間隔は狭く（最大でも数度まで）、ましてや同一視野内に収まらない程2刺激が離れた状況や、頭部を回転して視点移動しなければならない状況など想定していない。よって過去の研究成果からは、下線部の間に対する解答は得られない。色弁別作業では色覚特性の優れた網膜中心窩での観察が主になるため、外界での刺激の空間的な配置の変化は、視覚系への入力の時系列の変化となる。その意味では時間と空間の総合的な刺激配置の影響を検討する必要がある。さらには記憶のメカニズムにも関係してくる。また視点移動のための諸動作（眼球運動、頭部回転運動）の影響も考えなければならない。

本研究の目的は色弁別能力に及ぼす空間配置の影響を、同一視野から外れるような状況にまで拡張して定量的に測定し、刺激の時空間配置を考慮した均等色空間や色差式の開発に必要な基礎データを提供することにある。さらに視覚系入力における時系列の変化や視点移動の影響、周辺視野の働きなどを考慮し、弁別能力を決定する要因についても総合的に検討する。

この論文は7つの章から構成されている。この第1章の序論に続いて、第2章では実験手法および実験装置について説明する。第3章では等色の繰り返し精度を測定することにより、色弁別能力に与える刺激の空間的ギャップの影響について考察する。第4章では等色作業中の被験者の視点の動きの解析結果から、等色作業中の被験者の観察状況を定量的に把握し、被験者の観察方法や視覚系の採る戦略（ストラテジー）が空間配置によってどのように変化するか考察する。さらに視点移動による時間的ギャップを求め、第5章の実験に発展させる。第5章では、ここまでの結果を基に、継時的に呈示されたときの、等色の繰り返し精度における時間的ギャップの影響を測定し、視点移動による時間的ギャップが第3章の結果の要因になっているかどうか検討する。第6章で総合的な考察および応用について述べ、第7章でこの研究で得られた結論を述べる。

## 第2章 実験手法および装置

### 2.1 等色の繰り返し精度

#### 2.1.1 原理

1.3で述べたように、本研究の目的は「2刺激の空間的な配置変化や呈示の時間条件変化など、刺激呈示の物理条件を変えたときに色弁別能力に現れる変化を測定する」ことにある。本研究では、等色の繰り返し精度を測定することで色弁別能力を評価する。被験者は等色刺激の色 $C_v$ を調節して、参照刺激の色 $C_r$ と等しくなるように設定する（等色する）。この作業を多数回繰り返したとき被験者の設定は、色弁別能力に応じてある範囲でばらつくはずである。したがって何らかの定義に基づいてこのばらつきの大きさを評価すれば色弁別能力を表わす指標が得られる。一般的に等色のばらつきは、2次元的には楕円、3次元的には楕円体で表現される。本研究では従来の手法を改良した方法により、等色の精度を表わす楕円体を導出する。続く2.1.2で従来の手法について概説し、2.1.3で本研究で新たに提案する手法について詳しく解説する。

#### 2.1.2 従来の方法\*

1.2.3の(i)でも触れたが、等色のばらつきで色弁別閾を評価する方法はMacAdam(1942)から本格的に行われるようになった。2°二分視野（図1-6参照）の一方の視野を形成する色刺激は色彩計によって作り出される。被験者は1つのコントロールノブを操作して色彩計の色を調節するが、このときの刺激の色は等輝度に保たれたままCIE1931xy色度図上の直線に沿って変化する。多数回等色を繰り返し、設定値の標準偏差を求める。この標準偏差を1つの参照刺激に対して6~9方向について求め、色度図上にプロットすると、参照刺激の色度点を中心とした楕円が形成される（図2-1）。これは色弁別楕円と呼ばれ、輝度を含まない2次元的な色度弁別閾の指標として用いられる。MacAdamはこの楕円を25の参照刺激について求め、CIE1931xy色度図の不均一性を指摘した（図1-7参照）。また、この標準偏差はJNDの約1/3に相当することも明らかにした。このMacAdam(1942)の実験のように、1次元的に色を変化させて等色し、楕円（体）を導出する方法は、最近ではIndow, Robertson, von Grunau, and Fielder(1992)で採用されている。

一方、Brown and MacAdam(1949)や、Wyszecki and Fielder(1971)は3つの原刺激量が同時に調整可能な色彩計を用いて、3次元的に色弁別閾を測定している。等色を繰り返したときの設定値（等色点）は、任意の色空間にプロットすると3次元の正規確率分布を形成する（Brown 1952）。そのため3次元的な

\*参考文献 Wyszecki and Stiles, *Color Science*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York (1982)

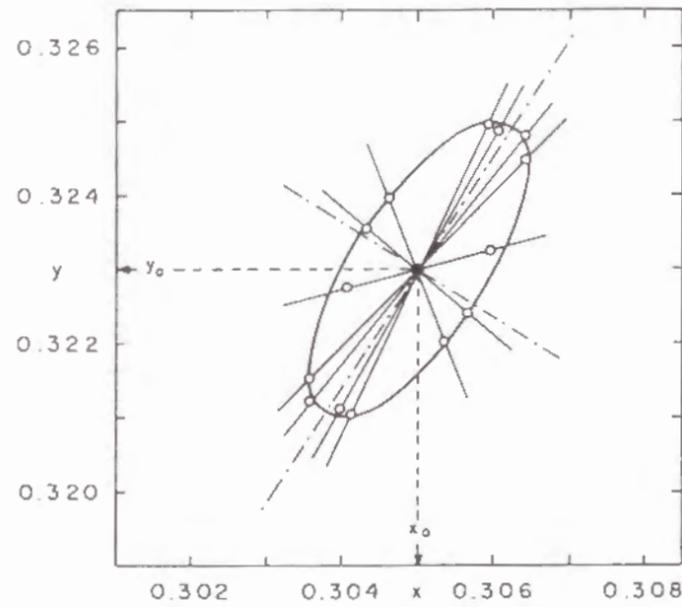


図2-1 1軸方向の色弁別閾から等色楕円を導出した、MacAdam(1942)の色弁別実験。

色弁別閾は楕円体で表現される。両研究ではともに輝度値をCIE1931xy色度と比較可能な次元にするため、(2-1)式で定義される $l$ を用い、 $l$ 軸が $xy$ 色度平面に直交する $xyl$ 色空間で結果を整理している。

$$l = 0.7 \cdot \log Y \quad (2-1)$$

$$(ds)^2 = g_{11}(dx)^2 + g_{22}(dy)^2 + g_{33}(dl)^2 + 2g_{12}dx \cdot dy + 2g_{23}dy \cdot dl + 2g_{31}dx \cdot dl \quad (2-2)$$

$xyl$ 色空間での楕円体は、 $dx$ 、 $dy$ 、 $dl$ を中心点(平均値)からの $x$ 、 $y$ 、 $l$ 値の差として、(2-2)式で表わされる。係数 $g_{ij}$ は分散値、共分散値を成分とする行列の逆行列(2-3)式から計算される値である。

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{31} \\ g_{12} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{23} & g_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{var}(x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(l, x) \\ \text{cov}(x, y) & \text{var}(y) & \text{cov}(y, l) \\ \text{cov}(l, x) & \text{cov}(y, l) & \text{var}(l) \end{bmatrix}^{-1} \quad (2-3)$$

$(ds)^2$ の値によって様々な大きさの楕円体が定義されるが、Brown and MacAdam(1949)では $(ds)^2 = 1$ として等色楕円体を定義している。このときの楕円体の径は各方向の標準偏差に相当し、特に中心を通り等輝度平面による楕円断面は、先ほどのMacAdamの色弁別楕円に等しくなる。したがって、 $(ds)^2 = 1$ で定義

される楕円体は標準偏差楕円体と呼ばれる。Wyszecki and Fielder(1971)は「 $dx$ 、 $dy$ 、 $dl$ が正規確率分布に従うときには $(ds)^2$ は自由度3の $\chi^2$ 分布に従う」という統計的定理に基づいて、95%の確率分布を包括するような等色楕円体を定義している(図2-2)。そのために $(ds)^2 = 7.81$ としている。当然、Brown and MacAdam(1949)の楕円体に比べて大きくなる。ちなみに $(ds)^2 = 1$ で定義される標準偏差楕円体は20%の確率分布を包括する楕円体と言える。

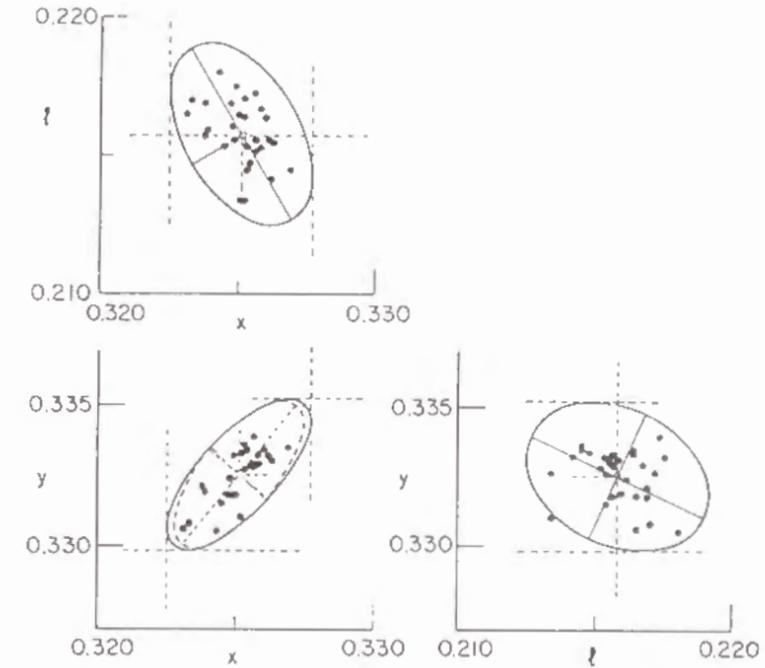


図2-2 3次元の等色から等色楕円体を導出(Wyszecki and Fielder 1971)。

### 2.1.3 本研究で提案する方法

Wyszecki and Fielder(1971)は等色楕円体の再現性を調べるために、同一条件、同一被験者に対して、数週間あるいは数カ月の間を置いて等色楕円体を求め、比較した(図2-3)。図2-3が示す通り、再現性はあまり良くないことが分かる。この等色楕円体の不一致は、統計的に予測されるばらつきよりも大きく、1回のセッションだけで等色楕円体を求めることは危険であることを示している。したがって、本研究では多数回のセッションから等色楕円体を求めことにした。しかし、本研究の刺激呈示装置はフィルム状の色フィルタを用いているため、この類のフィルタの宿命として熱や光による退色性の経年変化が起こる。そのため、セッション毎に等色点がずれてゆき、そのずれが等色の繰り返し精度に反映される可能性がある。その問題を回避するために従来の方法を改良した。以下にその方法を解説するが、(1)、(2)が従来と異なる箇所である。

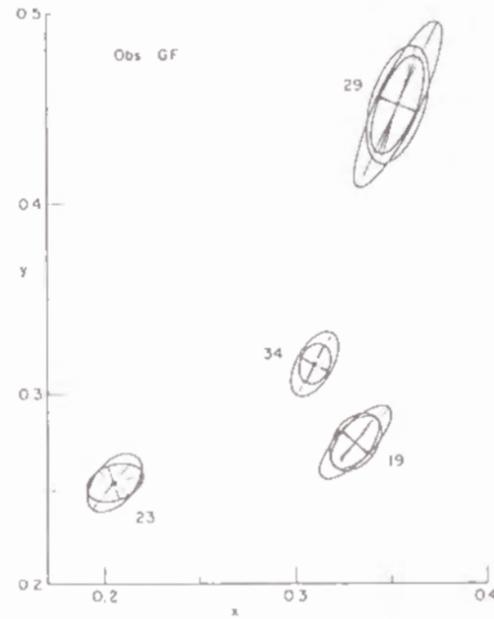


図2-3 等色楕円体の再現性 (Wyszecki and Fielder 1971)。

等色繰り返し精度の測定方法および等色楕円体の導出法

(1) 等色は1度に5回(または10回)続けて行なう。これを1ブロックとする。そして日を変えてまた1ブロックの等色をする。これを何ブロックか行なう。iブロックのj回目の等色点を、xyY色空間すなわちCIE1931xy色度平面に輝度軸Y(単位: cd/m<sup>2</sup>)が直交する色空間で(x<sub>ij</sub>, y<sub>ij</sub>, Y<sub>ij</sub>)と表わすことにする。

(2) ブロック毎の平均値、全体の平均値を算出する。各ブロックの平均座標(3次元的には重心点)が全体の平均座標に重なるように、等色点をブロック毎に平行移動する(図2-4)。i番目のブロックの平均座標を(x<sub>i0</sub>, y<sub>i0</sub>, Y<sub>i0</sub>)、全体の平均座標を(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>)とする。平行移動後の等色点の座標(x'<sub>ij</sub>, y'<sub>ij</sub>, Y'<sub>ij</sub>)は(2-4)式で表わされる。

$$\begin{aligned} x'_{ij} &= x_{ij} + x_0 - x_{i0} \\ y'_{ij} &= y_{ij} + y_0 - y_{i0} \\ Y'_{ij} &= Y_{ij} + Y_0 - Y_{i0} \end{aligned} \quad (2-4)$$

(3) 分散、共分散を計算し、係数g<sub>ij</sub>を得る。

分散、例えばnを全等色回数として

$$\text{var}(x) = \sum_{i,j} \frac{(x'_{i,j} - x_0)^2}{(n-1)} \quad (2-5)$$

共分散、例えば

$$\text{cov}(x, y) = \sum_{i,j} \frac{(x'_{i,j} - x_0) \cdot (y'_{i,j} - y_0)}{(n-1)} \quad (2-6)$$

係数g<sub>ij</sub>

$$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{31} \\ g_{12} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{23} & g_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{var}(x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(Y, x) \\ \text{cov}(x, y) & \text{var}(y) & \text{cov}(y, Y) \\ \text{cov}(Y, x) & \text{cov}(y, Y) & \text{var}(Y) \end{bmatrix}^{-1} \quad (2-7)$$

(4) 95%の等色点を含む楕円体(x, y, Y)は(2-8)、(2-9)式で与えられる。

$$(ds)^2 = g_{11}(dx)^2 + g_{22}(dy)^2 + g_{33}(dY)^2 + 2g_{12}dx \cdot dy + 2g_{23}dy \cdot dY + 2g_{31}dx \cdot dY$$

ただし、dx = x - x<sub>0</sub>、dy = y - y<sub>0</sub>、dY = Y - Y<sub>0</sub> (2-8)

$$(ds)^2 = 7.81 \quad (2-9)$$

(5) 楕円体体積V、等輝度断面の楕円面積A、輝度軸方向の径dYの計算。  
この95%等色楕円体の体積は、輝度、色度を含む3次元的な色の弁別精度を表わす。体積を求めるには(2-7)式の行列をまず対角化し(2-10式)、その対角成分を用いて(2-11)式によって計算する。この対角化は楕円体の回転にあたる。そして対角成分c<sub>ii</sub>の逆数は楕円体の長軸、中軸、短軸の長さに相当している。

行列の対角化  $\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{31} \\ g_{12} & g_{22} & g_{23} \\ g_{31} & g_{23} & g_{33} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix}$  (2-10)

$$V = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{(ds)^3}{(c_{11} \cdot c_{22} \cdot c_{33})^{1/2}} \quad (2-11)$$

(2-8)式に dY = 0 を代入すると、楕円の式(2-12式)が得られる。つまり楕円体の中心を通る等輝度面での断面は楕円になる(図2-4)。

$$(ds)^2 = g_{11}(dx)^2 + g_{22}(dy)^2 + 2g_{12}dx \cdot dy \quad (2-12)$$

この楕円の面積A (2-13式) は色度弁別の精度の指標となる。

$$A = \frac{\pi(ds)^2}{(g_{11} \cdot g_{22} - g_{12}^2)^{1/2}} \quad (2-13)$$

また、(2-8)式に  $dx = dy = 0$  を代入すると、中心を通る輝度方向の径dY (2-14式) が得られ、これが輝度弁別閾の指標となる。

$$dY = \frac{ds}{g_{33}^{1/2}} \quad (2-14)$$

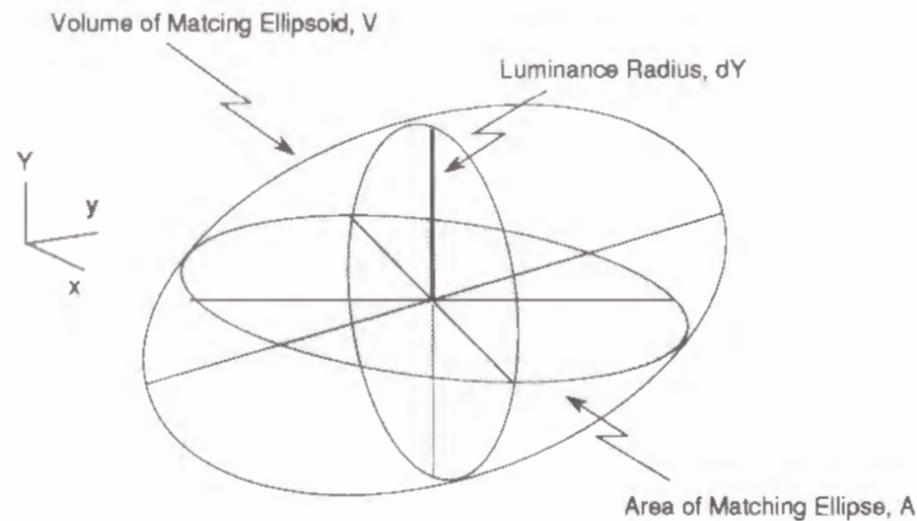


図2-4 等色楕円体の体積V、中心を通る等輝度面での断面楕円面積A および輝度軸方向の径dY。

## 2.2 刺激呈示装置

### 2.2.1 装置全体の構成

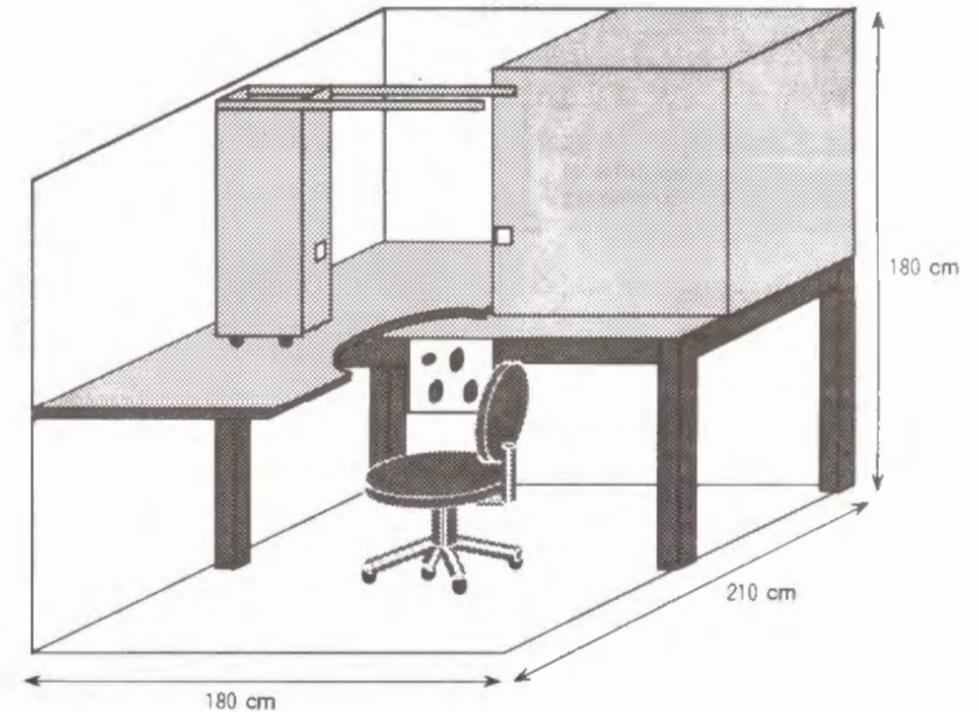


図2-5 実験ブースの概略図。

実験は照明なしのブース内で行なわれる(図2-5)。実験ブースおよび装置はすべて自作した。ブースは210×180×180 (cm<sup>3</sup>)の大きさで被験者はそのほぼ中央に固定された回転椅子に座り等色作業を行なう。2つの色刺激は共に大きさ1.8cm (視角にして約2°)の正方形で、被験者から約50離れたところに呈示される。刺激呈示装置は参照刺激呈示部と等色刺激呈示部に分かれている。被験者から見て右側にある等色刺激呈示部は調節可能なバーンハムタイプの色彩計(後述)で構成される。一方、参照刺激呈示部は被験者の頭上から延びたアームに固定されており、被験者を中心とした円周上を移動できるようになっている。それにより、2刺激までの視距離を変えることなく、2刺激間の間隔を様々に設定することができる。色彩計をコントロールするノブは等色刺激の下方部に固定されている。被験者は、必要に応じて頭部を回転させ、視点移動しながら2つの刺激を観察し、ノブを操作して等色することになる。

光学系の構成を図2-6に示す。P1、P2は共に150Wのハロゲンランプを光源とするスライドプロジェクタ(カラーキャビンIII、オートキャビン社製)であ

## 2.2.2 バーンハム色彩計の構造

本色彩計は、Burnham(1952)のものに明るさ調節機構を加えた改良型である。2.2.1で述べたように、R、G、B3枚の色フィルタ(F1-3)への入射面積に応じて様々な割合に分解されたR、G、Bの3色光は、積分管(IB1)により加法混色されて積分管端の拡散ガラス上に均一な等色刺激を形成する。被験者は色フィルタ(F1-3)の位置を水平および垂直に移動し、各フィルタへの入射面積を変えて調色する(図2-7)。さらに円形のNDウェッジフィルタ(NDW)を回転させて明るさを調節する。このように明るさと色を別々に調節するため、色を変えずに明るさだけ変えるなどの操作が容易にできるのが、この色彩計の特徴である。

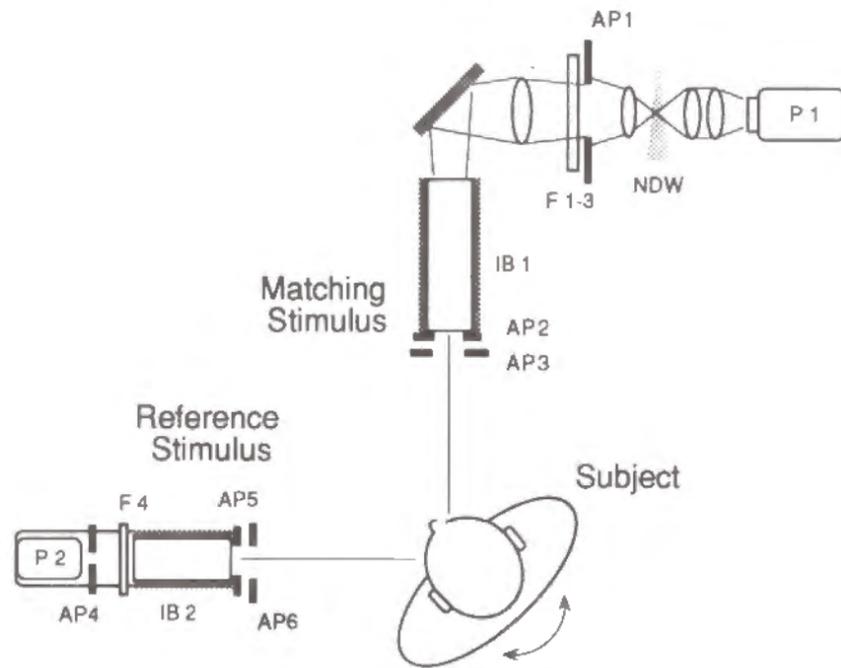


図2-6 刺激呈示装置の光学系。

る。両刺激呈示部は基本的には、光源(P1、P2)、色フィルタ(F1-3、F4)、積分管(IB1、IB2)の組み合わせで色を作り出している。まず、参照刺激呈示部から説明する。プロジェクタ(P2)からの光束は開口部で光量を落され色フィルタ(F4)に入射する。色フィルタF4は、単数または複数枚重ねたフィルム状の色フィルタで構成されている。F4を透過した光束は積分管IB2を通り、被験者側の端にある拡散ガラス上に参照刺激を形成する。拡散ガラスの前には、一辺1.8cm(視角にして約2°)の正方形の開口部が設けられており、これによりシャープなエッジをもった正方形の刺激を作り出している。またさらに被験者側5.5~6cm手前に2.4cm正方形の開口があり、被験者が斜めから観察することを防いでいる。等色刺激呈示部(バーンハム色彩計)では、プロジェクタ(P1)からの光束がNDウェッジフィルタ(NDW)、続いてR、G、B3枚の色フィルタ(F1-3)を通過する。各色フィルタの入射面積に応じて様々な割合に分解されたR、G、Bの3色光は、ミラーで90°方向を変えられ、積分管(IB1)に入射し、内部で加法混色されて積分管端の拡散ガラス上に均一な等色刺激を形成する。参照刺激の場合と同様に、1.8cm正方形の開口部により、被験者にはシャープなエッジの刺激が呈示される。また、さらに手前5.5~6cmの所に2.4cm正方形の開口があり、被験者は刺激を斜めから観察できないようになっている。

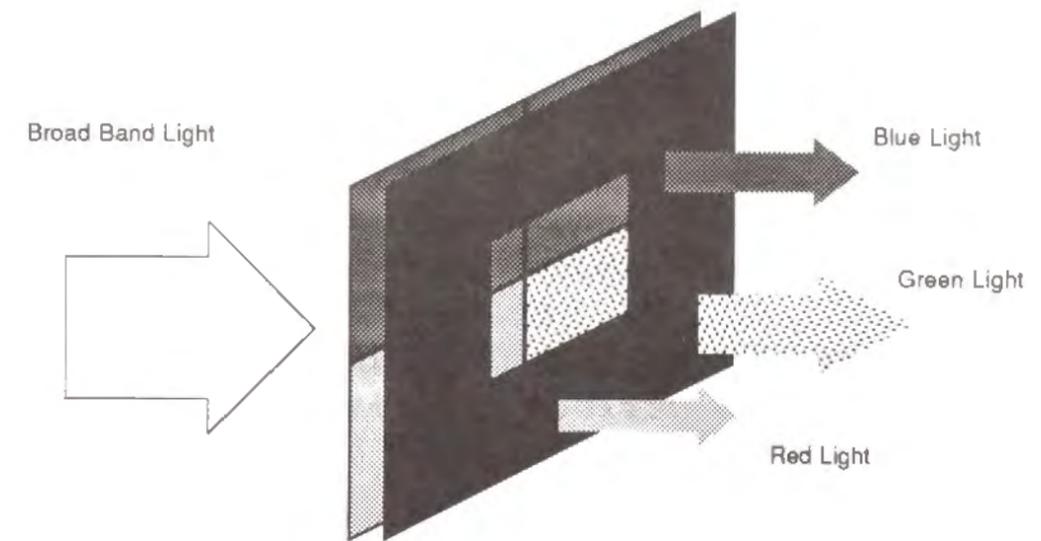


図2-7 色フィルタによる入射光の色分解。

NDウェッジフィルタ(NDW)は濃度が連続的に変化している円形のNDフィルタである。透過率の常用対数値は図2-8に示すように角度に対してほぼ線形に変化している。このフィルタの回転軸にはステッピングモータおよび1回転型のポテンショメータが直結している。被験者はこのモータを操作して濃度を調整し、等色刺激の明るさを調節する。回転角度に応じてポテンショメータによる電圧が変化し、その電圧値は実験者の前にあるデジタルパネル上に表示される。

色フィルタ(F1-3)は、図2-9のようにR、G、B3枚の色フィルタを隣合わせに並べ、両方から薄いガラスで挟んで作製されている。R、G、Bのフィルタには各々、図2-10に示される分光透過率を持つフジフィルム社の色フィルタSP-1(Bフィルタ)、SP-2(Gフィルタ)、SP-3(Rフィルタ)を用いた。色フィル

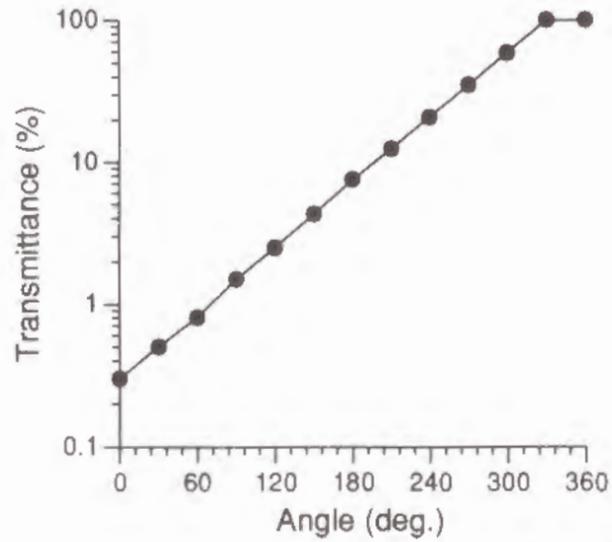


図2-8 円形NDウェッジフィルタの回転角度と透過率の関係。

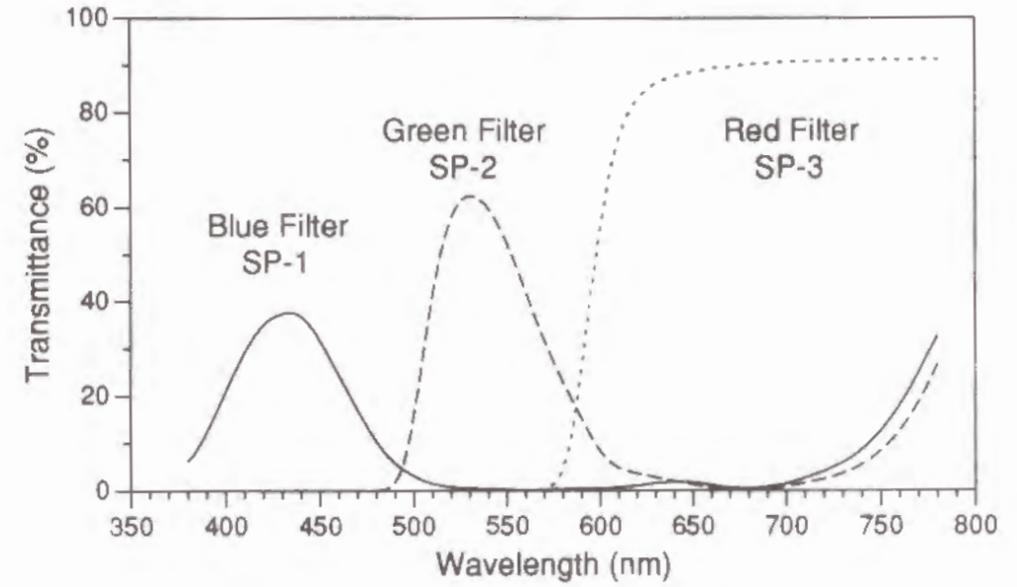


図2-10 色フィルタF1-3の分光透過率。

実線：SP-1(Blue)、破線：SP-2(Green)、点線：SP-3(Red)

タは水平垂直方向に動くスライドステージに固定されている。このスライドステージは2つの向軸ステッピングモータで駆動される。モータの片方の軸にはポテンショメータが接続されており、水平垂直方向のフィルタ移動量を知ることができる。電圧値はウェッジフィルタのときと同様に、実験者前のデジタルパネルに表示される。

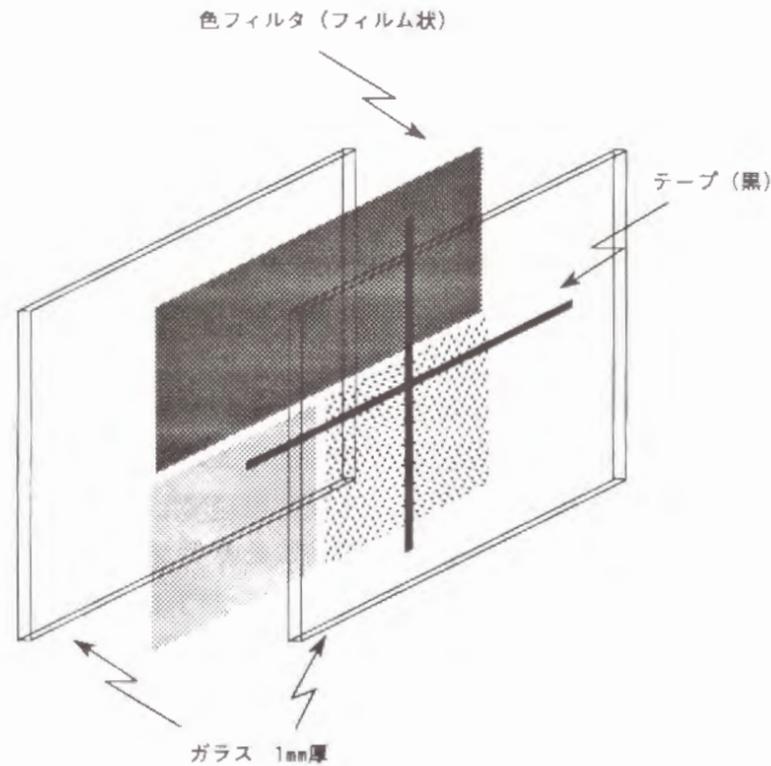


図2-9 色フィルタF1-3の構造。

積分管は断面が正方形の管で、両端に拡散ガラス、内壁がミラーになっている (図2-11)。本装置では管の途中に数枚 (IB1では2枚、IB2では1枚) の拡散ガラスを挿入することで混色能力を上げ、ムラのない色刺激を作っている。積分管は積分球に比べて構造が簡単で、高い輝度が得られるのが利点である。

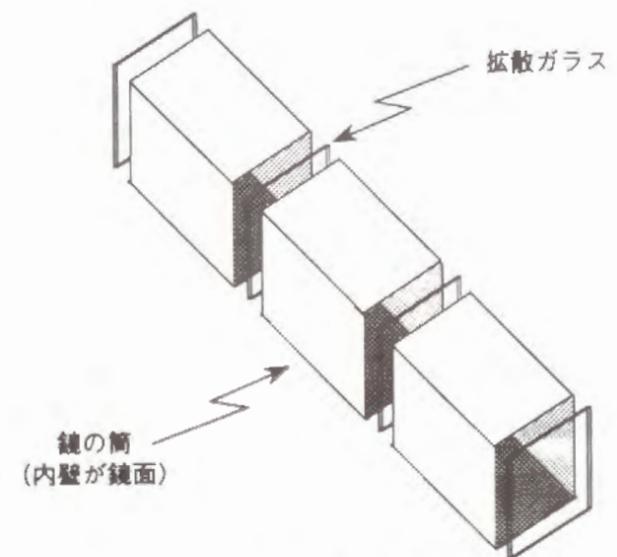


図2-11 積分管の構造。

NDウェッジフィルタ (NDW) の回転、色フィルタ (F1-3) の水平垂直方向への移動はステッピングモータによって行なわれる。これら3つのモータの回転は被験者または実験者のコントロールパネルにあるノブに同期して回転するため、スイッチ切り替えでモータをコントロールする方法に比べて格段に操作性が高い。3つのモータ駆動系は独立しており、例えば一つのモータ駆動系は図2-12のような構成になっている。ロータリーエンコーダに接続されたノブを回すとパルスが出力され、このパルスに応じてステッピングモータが回転する。ロータリーエンコーダはインクリメンタル形、つまり軸が回転しているときだけ回転角度に応じてパルスが出力されるタイプである。実際は位相のずれたA、B2相のパルス列が出力される。A、B2相のパルス列は回転方向によって位相が異なるので、回転方向判別回路はその位相から回転方向を判定し、モータドライバのCWまたはCCWパルス端子のどちらかだけにパルス列を出力する。ロータリーエンコーダの分解能は600パルス/ラジアン (約0.1° の回転で1パルス出力)、ステッピングモータの1ステップ回転角度は0.36° である。

NDウェッジフィルタ (NDW) の回転角度、色フィルタ (F1-3) の水平および垂直方向への移動量は、先述のとおり、各々の軸に固定されたポテンシオメータによる電圧変化から知ることができる。電圧値は3<sub>1/2</sub>桁表示のデジタルパネルメータに表示される。このメータに表示された値をH、V、W (単位はmV) とし、この (H、V、W) を装置座標系として扱い、実際の色彩計の設定値 (色フィルタの水平垂直位置、ウェッジフィルタの回転角度) の代わりに用いることにする。

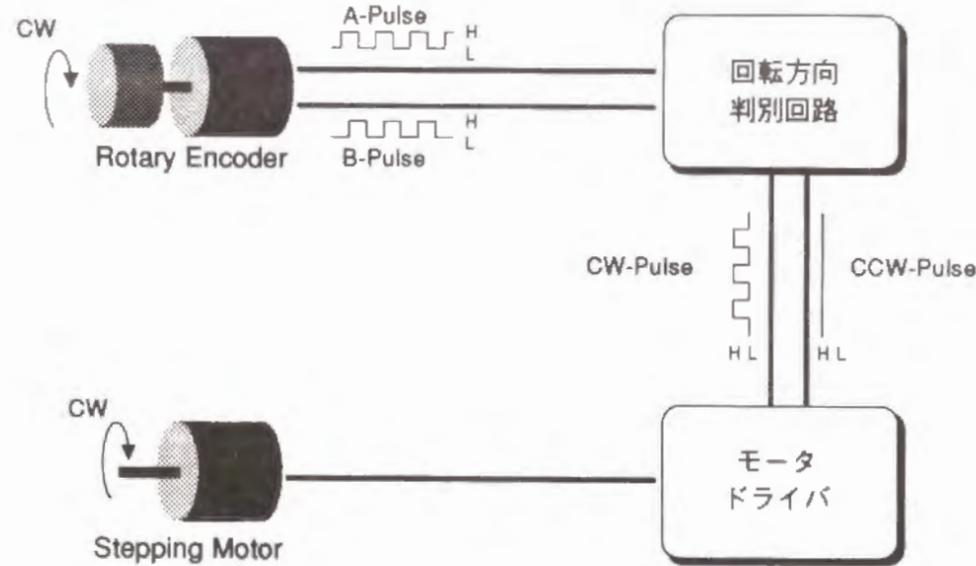


図2-12 モータ駆動系。

### 2.2.3 バーンハム色彩計の校正および特性

#### (i) 装置座標系 (H, V, W) から色度と輝度 (x, y, Y) への変換

基本的には各フィルタへの入射面積の比から各原色の混合比率が分かる (Burnham 1952)。例えば開口部が、フィルタに対して図2-13のように位置しているときに混色してできる色刺激の三刺激値 ( $X_M$ ,  $Y_M$ ,  $Z_M$ ) は次のように計算される。

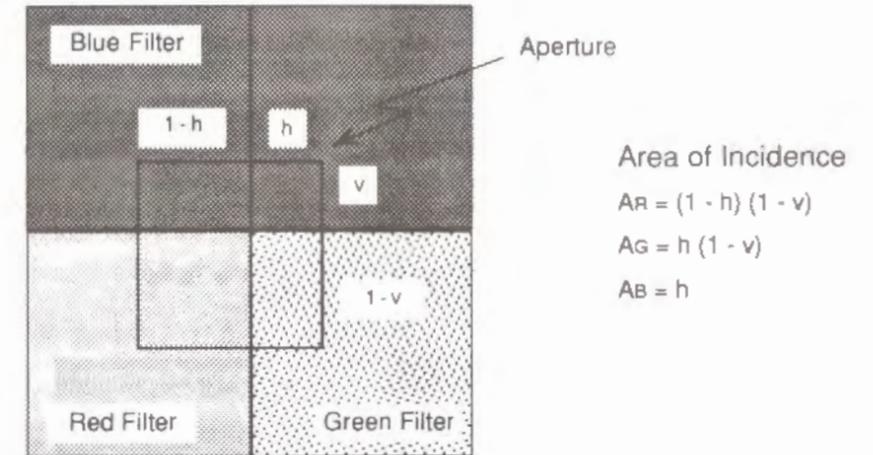


図2-13 バーンハム色彩計の混色原理。

フィルタ中央部の、開口部に対する相対位置を  $h, v$  ( $0 \leq h, v \leq 1$ ) とすると、R、G、Bフィルタへの入射面積比は

$$A_R : A_G : A_B = (1-h) \cdot (1-v) : h \cdot (1-v) : v \quad (2-15)$$

ただし  $A_R + A_G + A_B = 1$

と表わせる。したがって、この面積比と原刺激の三刺激値 ( $X_R, Y_R, Z_R$ )、( $X_G, Y_G, Z_G$ )、( $X_B, Y_B, Z_B$ ) から、

$$\begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} = A_R \begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ Z_R \end{bmatrix} + A_G \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + A_B \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

と表わされる。しかし実際にフィルタ位置を把握して、各フィルタへの入射面積を正確に計算することは困難である。そこで本色彩計では、適当に4つの基準位置 (primary position) を定め、そのときに混色されてできる色を原色と

考える。さらにその基準位置からの相対位置を基に、各原色の混色比を計算することにした。ちなみに本色彩計では、図2-14に示すように、 $H_0=160$ 、 $H_1=860$ 、 $V_0=-800$ 、 $V_1=-100$ として、 $(H_0, V_0)$ 、 $(H_1, V_0)$ 、 $(H_0, V_1)$ 、 $(H_1, V_1)$ の4ヶ所を基準位置に定め、各基準位置のときの刺激をr-primary、g-primary、p-primary、b-primaryと定義した。

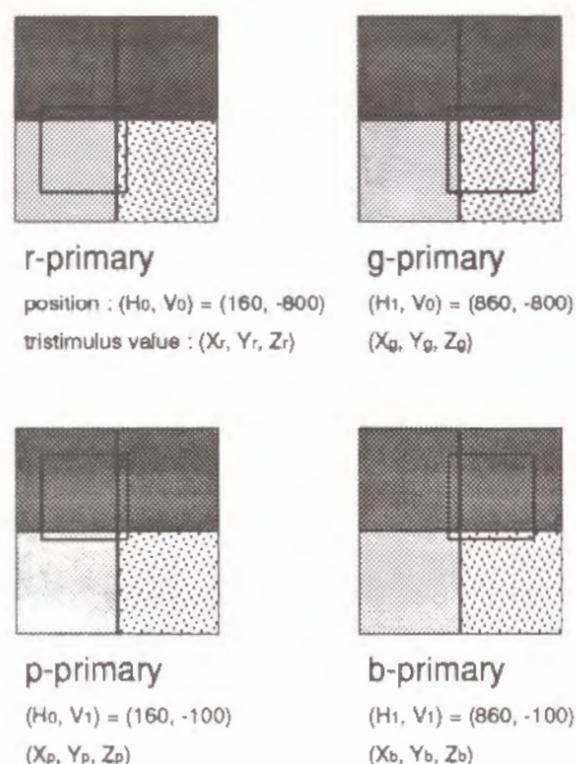


図2-14 4つの基準位置 (primary position)。

以下に装置座標の $(H, V, W)$ から三刺激値 $(X, Y, Z)$ 、および色度座標と輝度 $(x, y, Y)$ への変換方法を述べる。

(1) あらかじめ、フィルタを基準位置に設定し、原色の三刺激値 $X_r, Y_r, Z_r, X_g, Y_g, \dots$ をNDウェッジフィルタの角度 $(W)$ の関数として求めておく。

(2) メータの読みが $(H, V, W)$ であったとき、各原色の混色比率は、 $H$ と $V$ の値から次式によって与えられる。

$$A_r = \frac{(H_1 - H) \cdot (V_1 - V)}{(H_1 - H_0) \cdot (V_1 - V_0)}$$

$$A_g = \frac{(H - H_0) \cdot (V_1 - V)}{(H_1 - H_0) \cdot (V_1 - V_0)}$$

$$A_p = \frac{(H_1 - H) \cdot (V - V_0)}{(H_1 - H_0) \cdot (V_1 - V_0)} \quad (2-17)$$

$$A_b = \frac{(H - H_0) \cdot (V - V_0)}{(H_1 - H_0) \cdot (V_1 - V_0)}$$

(3) 混色してできる色刺激の三刺激値 $(X_M, Y_M, Z_M)$ 、さらに色度座標 $(x_M, y_M)$ は次式によって計算される。

$$\begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} = A_r \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} + A_g \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} + A_p \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} + A_b \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

$$x_M = \frac{X_M}{X_M + Y_M + Z_M}, \quad y_M = \frac{Y_M}{X_M + Y_M + Z_M} \quad (2-19)$$

上記(1)の測定は4回行なった。光源の安定性(後述)を考慮して、電源投入30分後以降に測定した。測色器はミノルタ社のCS-100(データプロセッサDP-101接続)を使用。そして色彩計の目盛り $W$ の値に対する各原刺激の三刺激値 $(X_r, Y_r, Z_r, X_g, Y_g, Z_g, \dots)$ 、または色度と輝度 $(x_r, y_r, Y_r, x_g, y_g, Y_g, \dots)$ の回帰式を求めた。具体的な式は付録の(A-1)式~(A-4)式に示した。

装置座標系、つまり色彩計の目盛り $(H, V, W)$ から色度座標 $(x, y)$ および輝度 $Y$ への変換方法をまとめると、図2-15のように表わされる。まず、 $(H, V)$ から(2-17)式により各原刺激の混色比 $(A_r, A_g, A_p, A_b)$ に変換される。また、 $W$ の値から(A-1)、(A-2)、(A-3)、(A-4)式のいずれかを用いて、 $(x_r, y_r, Y_r, x_g, \dots)$ または $(X_r, Y_r, Z_r, X_g, \dots)$ が計算される。さらに混色比 $(A_r, A_g, A_p, A_b)$ と原刺激の三刺激値 $(X_r, Y_r, Z_r, X_g, \dots)$ から混色刺激の三刺激値 $(X_M, Y_M, Z_M)$ が計算される(2-18式)。最終的に色度と輝度 $(x_M, y_M, Y_M)$ には(2-19)式により変換できる。

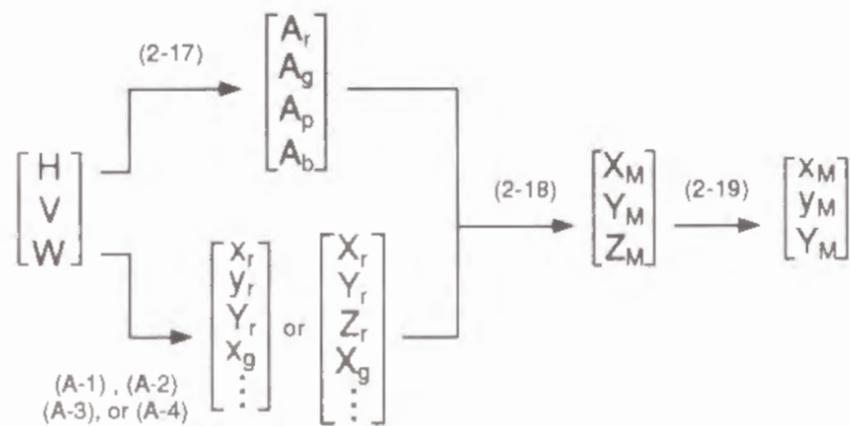


図2-15 装置座標系(H, V, W)から色度輝度(x, y, Y)への変換。

(ii) フィルタ移動量に対する色度点の変化

フィルタ移動に対応して、計算される色度点がどのように変化するかを図2-16に示す。このときWの値は500に固定し、H、Vの値は100間隔で変化させて色度座標を計算した。4つの角は各原刺激の色度である。

水平垂直のどちらか片方だけを動かしたとき、色度座標上では直線上を移動している。Hの変化に対して色度図上ではほぼ等間隔に直線上を移動しているが、Vでは、Vの増加に伴って色度点の間隔が広がっている。これはBのフィルタだけが他のRやGのフィルタに比べて透過率が低く、透過光が暗いためである。図2-16に示された格子間隔の不均等性は、ノブの回転角度に対する色度点の移動量が、色度図上の位置や方向によって異なることを意味する。したがって、等色楕円体の方向（長軸や短軸の向き）や大きさも、この特性に依存する可能性はある。

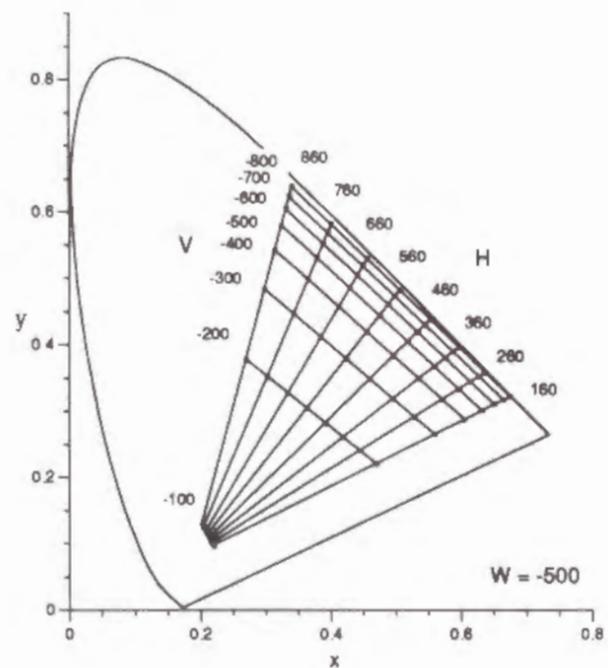


図2-16 フィルタ位置(H, V)と色度(x, y)の関係

(iii) 色彩計の精度

色彩計の安定性を調べるために、光源の電源投入後の時間経過に対する色度、輝度の変化を測定した。(H, V, W)は(510, -450, -500)に設定し、電源ONの後5分間隔で測光した(ミノルタ社のCS 100を使用)。日を変えて2回測定した。その結果を図2-17の左側のグラフに表示する。色度座標はx, y共に電源投入直後に大きく変化し、その後ほぼ一定となっている。輝度に関しては投入直後の変化は見られなかった。以上から、実験および測光は電源投入後30分以上経過して、色彩計が安定した後に行なうこととした。30分以降の測定値の揺らぎをxyY色空間内にプロットし、95%の分布を含む楕円体を導出すると図2-17右側グラフのようになる\*。上段はxy平面への投影点、下段はxy平面への投影点を示している。図中の楕円は、楕円体の中心を通る各平面による断面を表わしている。

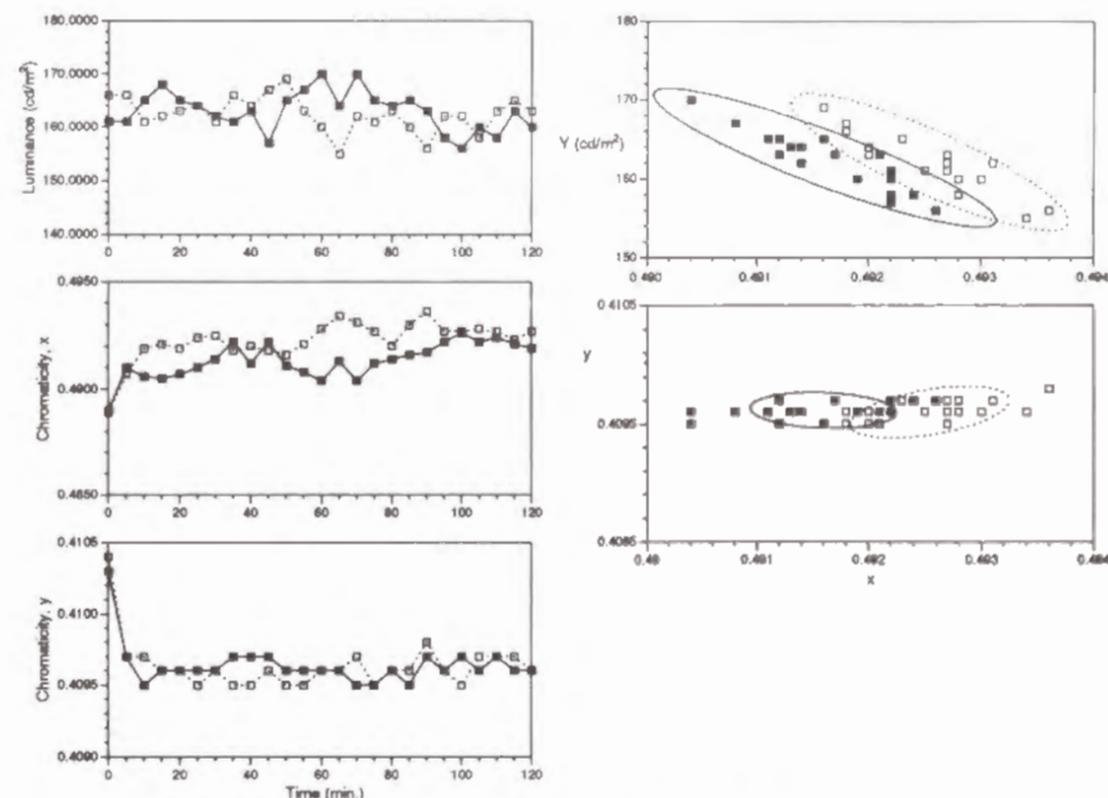


図2-17 電源投入後の時間経過に対する光源の色度、輝度の変化(左グラフ)。電源投入30分後以降の光源の安定性。95%楕円体近似(右グラフ)。

測定した日によって楕円の中心位置や大きさが異なっているが、2.1.3で述べた(2)のデータ処理を行なうことにより、セッション間の色彩計の不安定性

\*本文2.1.3の(3)、(4)を参照。

は吸収される。したがって、セッション内での安定性が保たれていればよい。図2-17の左の楕円で示される程度の揺らぎは、過去の研究報告と照らし合わせてみても、弁別閾に比べて十分小さく、等色の繰り返し精度測定に十分可能な範囲と言える。

バーナムタイプの色彩計の精度は、色フィルタの移動精度に大きく依存する。本色彩計ではスライドステージを用いているが、モータ軸の回転運動をステージの線形運動に変換する機構はラックピニオン型であり、移動精度にはギヤの遊びが反映される。具体的に言うと、デジタルパネルメータの値HやVが同じでも、コントロールノブをどちらの方向から回して止める（設定する）かによって、実際のフィルタ位置が異なるという問題が起こる。そこでH、V各々の値を上から、または下から動かして止め、そのときの測色値を比較した。その差は色度、輝度とも弁別閾に比べて十分小さいが、色度図上の位置や変化方向で大きさが異なり、等色楕円体の方向（長軸や短軸の向き）や大きさに反映される可能性がある。図2-18に測色結果の一部を示す。設定方法による色度図上での差は50倍に拡大された四角形で表現されている。ちなみに点は平均値を示している。

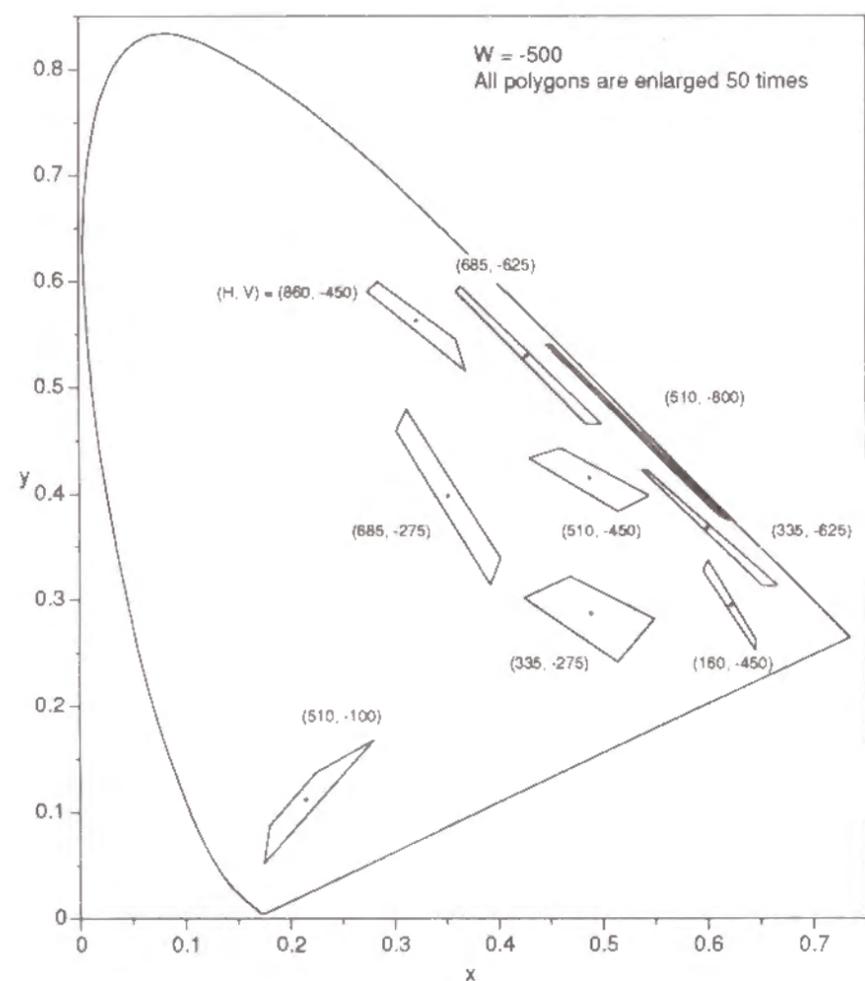


図2-18 コントロールノブの停止方向と色度の関係。

色度図上の位置によって四角形の大きさや方向が異なっており、図2-16と同様の特性を示している。この図2-16、図2-18で示されるような色彩計の特性を排除して、純粹に色弁別特性だけを反映した等色楕円体を求めることは可能である（Wyszecki 1959）。しかし本研究では、刺激呈示の物理条件の違いによる、等色楕円体の“変化”を測定することが主目的であり、等色楕円体の絶対的な大きさや向き、さらに異なる色度点での楕円体の比較はあまり重要ではないので、2.1.3で述べたデータ処理（2）以外の措置は特別功しないことにした。

#### (iv) 色彩計の正確度

色彩計の目盛（H、V、W）から計算される値と実際の測定値を比較した。測定点はW=-500、-800の2レベルに対し（H、V）=(510, 450)、(160, -450)、(335, -275)、(335, -625)、(510, -100)、(510, -800)、(685, -275)、(685, -625)、(860, 450)の計9点。スライドステージのギヤ遊びを考慮して（H、Vの設定の仕方を変えて）各4回測定した（ミノルタ社のCS-100を使用）。

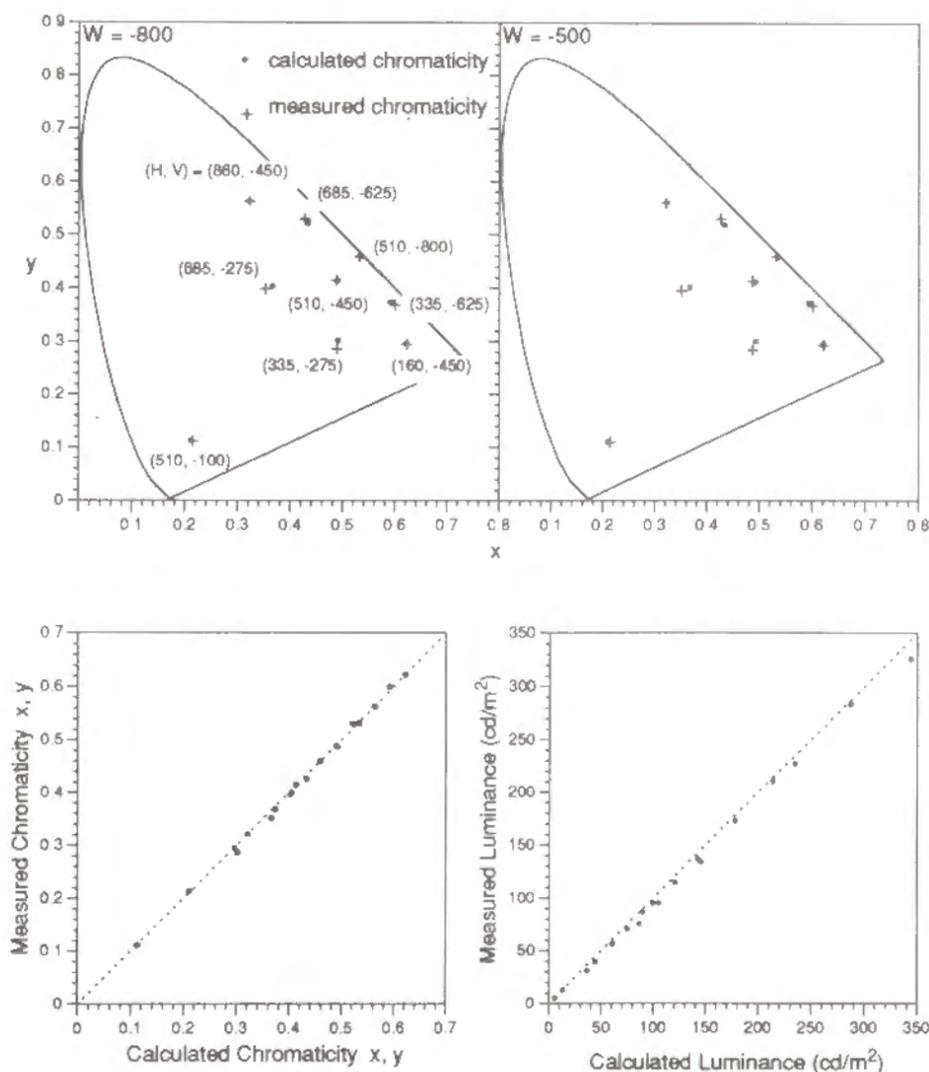


図2-19 色彩計の目盛（H、V、W）から計算される色度および輝度値と実際の測定値との比。

その平均値を計算値と共に図2-19に示す。上段は色度図上での比較であるが、(685, 275)、(335, 275)、(335, 625)で計算値と実測値のずれが目立っている。下段グラフでは横軸に計算値、縦軸に実測値をプロットした。ほぼ、点線で示される傾き45度の直線上に点が打たれている。計算値と実測値の色度座標の差 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ は平均で0.0047、輝度差 $\Delta Y$ は計算値 $Y$ にたいして約5.6%となった。

### 第3章 等色の繰り返し精度における刺激間の空間ギャップの影響

#### 3.1 実験1：自由等色における繰り返し精度\*

##### 3.1.1 実験目的

色差式中にパラメータを導入して、刺激の物理的条件の違いを補正する方法を提案したのはJudd(1939)が最初である。Juddの色差式は(3-1)式で表わされる。

$$\begin{aligned}\Delta E &= (\Delta L^2 + \Delta C^2)^{1/2} \\ \Delta L &= k_1 \cdot \Delta(Y^{1/2}) \\ \Delta C &= k_2 \cdot Y^{1/4} \cdot \Delta S\end{aligned}\tag{3-1}$$

ここで $\Delta E$ 、 $\Delta L$ 、 $\Delta C$ は各々色差、明度差、色度差を表わし、 $Y$ はルミナンス・ファクター、 $\Delta S$ はJuddの提案する均等色度図上での距離である。 $k_1$ と $k_2$ の比は、色差に与える色度差と明度差の相対寄与率に相当するが、 $k_2$ は600と一定とし、 $k_1$ はギャップなしで隣接しているときは120、ごく細い線で分割されているときは90~100、広い領域で分割されているときは30~40と設定している。これにより、ギャップによる明度差の寄与低下、つまり明度弁別閾上昇を色差式中に反映させている。

さらにTraub and Blinkin(1961)は実験によって、 $k_1$ を刺激間ギャップの大きさ $\theta$  (単位は度) の関数として導出している。

$$k_2(\theta) = 30 + \frac{18}{0.2 + \theta^{1/2}}\tag{3-2}$$

この式もギャップ増大に伴う明度差寄与の低下を示している。しかし色度差知覚においては、明確な影響は見られなかった。

Sharpe and Wyszecki(1976)は刺激間ギャップの色差知覚特性に与える影響を、直接色差比較、恒常法による色弁別閾値測定、等色楕円体測定の方法を用いて比較している。刺激の大きさは $2^\circ$ で、ギャップの大きさは $0^\circ$  (ごく細い境界線)、 $1.6^\circ$ 、 $4.1^\circ$ である。色弁別閾上の色差知覚に対してはギャップの存在による明確な差は得られなかったが、弁別閾値自体は色度弁別と明るさ(輝度)弁別の両方で増大していた。このことから係数 $k_1$ による刺激間隔の影響の補正は、閾付近の微小色差に対しては有効であると結論している。

\*3.1の内容は、篠田博之、池田光男：大きな視点移動を伴う等色作業における繰り返し精度，照明学会誌，78-2，pp.76-82 (1994)に掲載されている。

Boynton, Hayhoe, and MacLeod(1977)は2刺激間に全く境界がない条件と2.7'のギャップが存在する条件での色弁別能力を比較している。ギャップの存在により輝度弁別能は低下したが、色度弁別では2刺激の色度差の方向によって弁別能が上昇することもあり、結果は一貫していなかった。

Witt(1990)はアクリルラッカー塗料で塗装された色サンプルを用いて、刺激間ギャップの影響を測定している。刺激の大きさは $10^\circ$ 、ギャップの大きさは $0.5^\circ$ で、恒常法によりxyY色空間内での色弁別楕円体を導出している。ギャップの存在により、楕円体の等輝度断面での楕円面積は平均で1.8倍(1.3~2.2倍)の増大、輝度弁別閾は平均で1.9倍(1.4~2.3倍)の増加が観察された。

我々を取り巻く視環境の色彩を扱う場合、対象物を移動したり一部分だけを取り出して観察、評価できないことが多い。歩行者が道路を挟む2つの建物の色を比較する場合、2つを同時に観察することは不可能である。したがって眼を動かすなり頭を回転するなりして視点を移動して比較することになる。しかしそこには当然時間的な隔たりもあり、2つの対象物を手にとって両者を突き合わせて見比べるのは異なった観察状況になっている。このときの色弁別能力はどの程度なのだろうか。明らかに離れている方が比較は難しいと感じる。したがって、弁別能力の低下が予想される。しかし上記の研究ではいずれも刺激間隔の狭い範囲を対象にしているため、この間に答えることができない。

本実験ではより一般的な状況、つまり日常我々が行なっている色比較時での色弁別特性を明らかにすることを目的としている。そのために刺激間隔(中心間の距離)を $6^\circ \sim 120^\circ$ とし、2刺激が同時に比較できる状況から、同一視野に収まらず頭部回転による大きな視点移動を必要とする状況までを再現した。そしてその範囲で等色作業の繰り返し精度(Repeatability)を測定し、色弁別閾の刺激間隔に対する依存性を検討した。

### 3.1.2 実験

#### 等色の繰り返し精度

被験者は色彩計により与えられる等色刺激の色度、明るさを調節して参照刺激に等色する。この作業を繰り返したとき等色点は色空間内である範囲をもってばらつく。一般にばらつきは3次元の正規確率分布に従う。等確率密度面は楕円体表面を形成するため、等色のばらつきは3次元色空間内の楕円体で近似される。本研究ではxyY色空間、つまりxy色度平面に輝度軸Yが直交する色空間に等色点をプロットし、ばらつきの範囲を95%の確率分布を包括するような楕円体で近似した。そしてこの楕円体の体積V、中心を通る等輝度断面の楕円面積A(色度弁別閾の指標となる)、輝度軸に平行な楕円体の径の長さdY(輝度弁別閾の指標)を求め、刺激間隔 $6^\circ \sim 120^\circ$ の範囲で比較した。具体的なデータ処理方法、楕円体の導出方法に関しては2.1を参照していただきたい。

#### 実験装置

実験装置に関しては2.2で詳しく説明しているが、ここでもごく簡単に説明しておく。実験はすべて暗黒のブース内(図2.5参照)で行なわれる。刺激呈示装置は参照刺激呈示部と等色刺激呈示部で構成される(図2.6参照)。

150Wハロゲンのスライドプロジェクタ(P2)、色フィルタ(F4)、積分管(IB2)で構成される参照刺激呈示部は被験者の頭上にあるアームに固定されており、被験者を中心とする円周上を移動できるようになっている。したがって常に被験者に対して正面を向いた状態でかつ視距離を変えることなく刺激間の間隔のみを変えることができる。参照刺激の切り替えは色フィルタ(F4)を差し替えることにより行なわれる。

一方、被験者によって調節可能な等色刺激呈示部はバーナムタイプの色彩計(Burnham 1952)を採用している。150Wハロゲンランプを光源とするスライドプロジェクタ(P1)からの光はNDウェッジフィルタ(NDW)を通過後、RGB3枚の色フィルタ(F1-3)に入射する。各色フィルタの入射面積に応じて様々な割合に分解されたR、G、Bの3色光は積分管(IB1)により加法混色されて均一な等色刺激を形成する。

このように参照刺激と等色刺激では異なったフィルタで色を作り出しており、被験者の行なう等色はメタメリックマッチとなる。被験者は色フィルタ(F1-3)の位置を垂直水平方向に移動させて各フィルタへの入射面積を変え、等色刺激の色を調節する。さらに円形NDウェッジフィルタ(NDW)を回転させて明るさを調節する。色フィルタの水平、垂直移動、NDウェッジフィルタの回転はそれぞれ別々のステッピングモータで駆動される。被験者は3つのロータリーエンコーダに接続されたつまみを操作して調色するが、モータはロータリーエンコーダからのパルス信号で駆動するため被験者の回すつまみに同期して回転する。したがってスイッチを切り替えてモータをコントロールする方法に比べて格段に操作性が良い。

フィルタの位置、NDフィルタの回転角度はモータ軸に固定されたポテンシオメータで計測されている。デジタルパネルメータ上に示される電圧値を(H, V, W)とし、装置座標系とする。2.2.3で述べた方法により、装置座標系(H, V, W)から色度と輝度(x, y, Y)へ変換される。尚、変換には付録1に記載の校正(I)の(A-1)式を用いている。

#### 実験条件

刺激から被験者までの距離は約50cmで、参照刺激、等色刺激の大きさは共に1.8cm(視角にして約 $2^\circ$ )の正方形である。また両刺激間の間隔(中心から中心までの距離)は $6^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ の6条件で、ギャップにすると $4^\circ$ 、 $13^\circ$ 、 $28^\circ$ 、 $58^\circ$ 、 $88^\circ$ 、 $118^\circ$ となる(図3.1)。

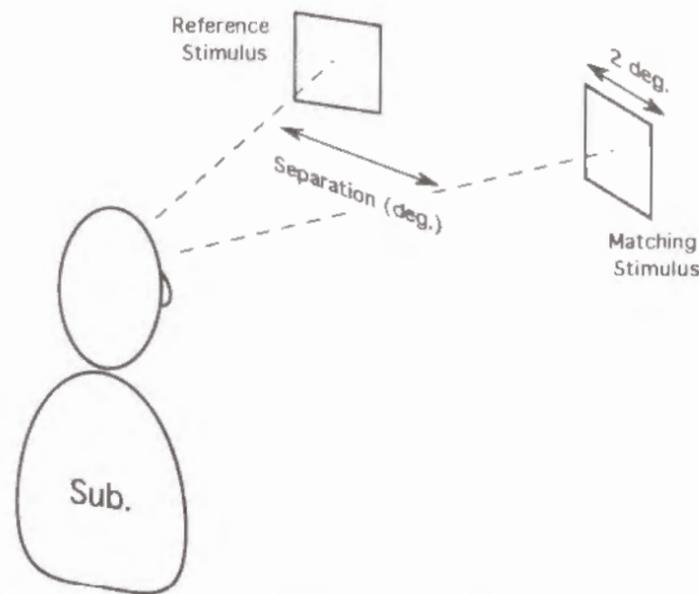


図3-1 刺激の大きさと刺激間隔。

参照刺激はYellow Green、Orange、Purpleの3種類で、いずれも単数または複数枚重ねた色フィルタ (F4) によって作られる。使用した色フィルタはフジフィルム社のSP-19とCC-Y50 (Yellow-Green)、SP-19とSP-4 (Orange)、SP-6 (Purple) である。分光透過率は付図A-1に示した。またミノルタ社製CS-100による測色値 (x, y, Y) を表3-1にまとめて示した。ブース内照明はなく周辺は暗黒となるため、刺激は開口色モードの見えを呈していた。

表3-1 参照刺激の測色値 (CIE1931xy色度座標と輝度)。

References	x	y	Y(cd/m <sup>2</sup> )
Yellow-Green	0.393	0.545	213.6
Orange	0.611	0.359	48.3
Purple	0.363	0.208	53.2

### 手続き

被験者はブース中央に固定された回転椅子に座り数分間の暗順応をする。始めは等色刺激のみが呈示されている。被験者がスイッチを押すと等色刺激から離れた位置に参照刺激が呈示される。被験者は必要に応じて眼球、頭部回転運動による視点移動をしながら、2つの刺激を両眼で自由に観察し等色する。身

体を後ろに反らしたり刺激を斜めから観察することは禁止されているが、それ以外の制限は特になく、また時間制限もなく、十分に納得いくまで作業を続けることができる。等色が完了したら実験者がフィルタの位置 (H, V)、NDフィルタの回転角度Wを記録する。被験者は自分で等色を崩し、次の等色作業に移る。等色は続けて5回繰り返す、これを1ブロックとする。1ブロックの等色が終了したら参照刺激を取り替えて同様の作業を行う。1セッションは被験者の負担を考慮して、2または3ブロックとした。1セッション内では刺激間隔は一定。1セッションの所要時間は20分になる。

### 被験者

被験者は、男性HS (27才)、TI (30)、KK (23)、KS (23) の4名と女性NM (24) 1名。いずれも色覚正常者で眼鏡は着用していない。被験者HS、NM、KSは過去に本装置での等色実験の経験の有するが、KK、TIは今回が初めてである。被験者HSとTIは6種類全ての刺激間隔で測定、他の3被験者は6°と120°の2条件でのみ測定した。等色は各参照刺激の一条件に対しHSが50回、TIが30回、他の被験者は20回行なった。表3-2に各参照刺激に対する等色回数を、被験者、刺激間隔別に示す。

表3-2 刺激間隔と全等色回数。

Sub.	Stimuli Separation					
	6°	15°	30°	60°	90°	120°
HS	50	50	50	50	50	50
TI	30	30	30	30	30	30
KK	20	—	—	—	—	20
KS	20	—	—	—	—	20
NM	20	—	—	—	—	20

### 3.1.3 結果と考察

#### (i) 等色楕円体

例として刺激間隔6°、参照刺激Yellow-Greenに対する被験者HSの等色楕円体を図3-2に示す。黒点は平行移動後の等色点の各面への投影で、実線で表される楕円は等色楕円体の中心を通る断面である。等色点のばらつきは、楕円体で良く近似されている。楕円体の中心値は参照刺激の測色値 (0.393, 0.545)

と必ずしも一致していないが、この理由は色彩計の誤差以外に、測色器CS-100内部の分光感度補正フィルタと被験者HSの有する等色関数の分光特性の不一致による、メタメリック等色点のずれが考えられる。被験者毎に等色中心（楕円体中心位置）が異なるのも、これと同じ理由による。また、参照刺激を測色した時期と色彩計（等色刺激）のキャリブレーションを行なった時期にずれがあるため、色フィルタの経年変化の影響を受けていることも原因の一つにある。

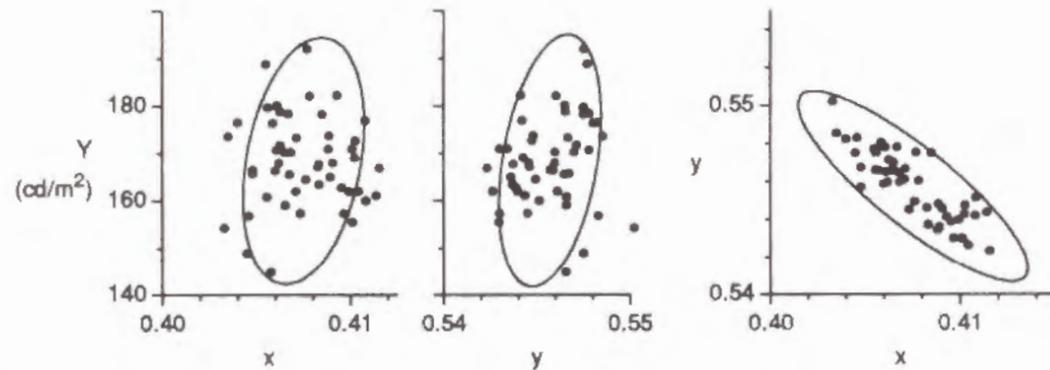


図3-2 xyY色空間での95%等色楕円体。黒点：被験者HS、刺激間隔6°、参照刺激Yellow-Greenに対する等色点の各平面への投影。実線の楕円：等色楕円体の中心を通る各平面による断面。xy平面（左図）、yY平面（中央図）、xy色度平面（右図）。

本実験で得られた等色楕円の形状を過去の研究と比較してみる。3次元のフリーマッチングで測定範囲が広く、本実験の参照刺激と色度図上で近い参照刺激を採用しているものでBrown(1957)の12人の被験者に対して求めた等色楕円がある。実験条件は、刺激は直径10°の二分視野、参照刺激の輝度は約10~20cd/m<sup>2</sup>、等色回数は12人合わせて720回。図3-3に被験者HSによる刺激間隔6°での等色楕円とBrownの楕円を5倍に拡大して表示した。太線は本実験の被験者HSのものである。ただしBrownは  $(ds)^2 = 1$  としていたがここでは比較のため  $(ds)^2 = 7.81$  として楕円を描いた。楕円の方向は良い一致が見られるが、形に関してはあまり良い一致は見られない。大きさに関しては、もし他の条件が全て等しければ、4°ギャップの効果で本実験のHSの方が大きくなるはずである。しかしそうはなっていない。いくつかの理由が考えられるが、第一に本実験で採用しているデータの処理、つまり各ブロックの平均値が等しくなるように平行移動しているため楕円体が小さくなったと考えられる。また刺激輝度が高くなると色度弁別閾値が下がる (Brown 1951、Connors 1964) ことが知られているが、Brownに比べて本実験の参照刺激の輝度が高いことにも関連があるだろう。特にYellow-Greenでは他の2刺激に比べて輝度が高いのでその影響が大きいのと思われる。更に被験者の等色作業に対する習熟度の影響も考えられる。Brownの12人の中には等色実験の経験の少ない被験者も含まれているが、

被験者HSはこの色彩計での等色にかなり熟練している。他の被験者、例えばTIと比べると楕円は一次元方向で約1/2の大きさであったことから考えてもこの推測は妥当であると思われる。

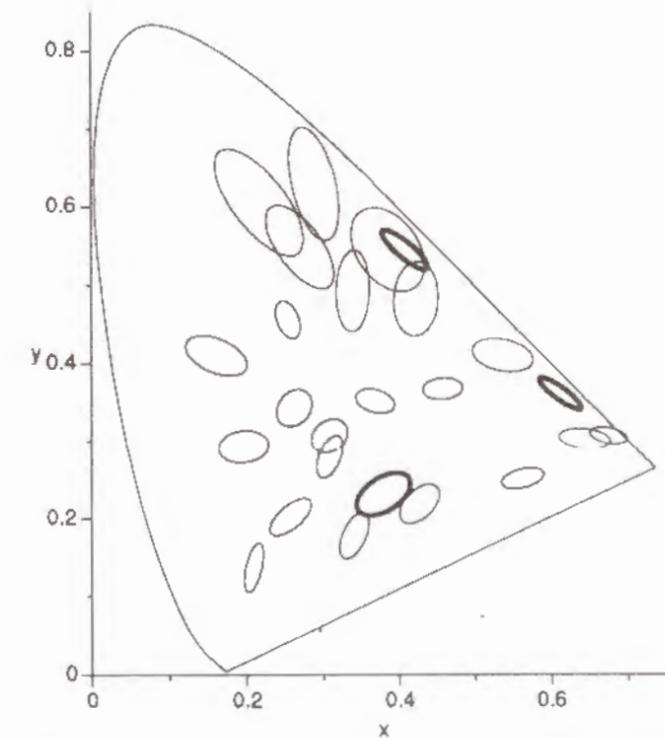


図3-3 本実験の等色楕円とBrown (1957) の楕円との比較。太線：本実験の被験者HSによる楕円、刺激間隔は6°。細線：Brownの12人の被験者による楕円、ただし比較のため  $(ds)^2 = 7.81$  とした。各楕円は5倍に拡大されて描かれている。

#### (ii) 刺激間隔の関数としての等色楕円体

図3-4~3-6に被験者HSの全等色点と等色楕円体\*を刺激間隔別に表示した。黒点は等色点のxy色度平面への投影、実線の楕円は95%楕円体の中心を通る等輝度断面を示している。また比較のため、刺激間隔15°以上のグラフ中に、6°での等色楕円を破線で描き加えた。刺激間隔による、楕円の方向や中心値に大きな変化は見られない。等色点の分布、楕円の大きさは間隔に伴って僅かながら拡大している。しかし変化は単調ではない。特にYellow Green (図3-4) とOrange (図3-5) では60°で楕円が最も大きくなっている。Purple (図3-6) では30°までは大きさがほとんど変わらず、60°以降で大きくなっている。被験者TIの等色楕円はここでは示さないが、HSと同様に楕円の中心値に大きなずれはなく、また大きさにおいても僅かな拡大が見られた。

\*他の被験者の等色点と等色楕円体は巻末の付録3に記載した。

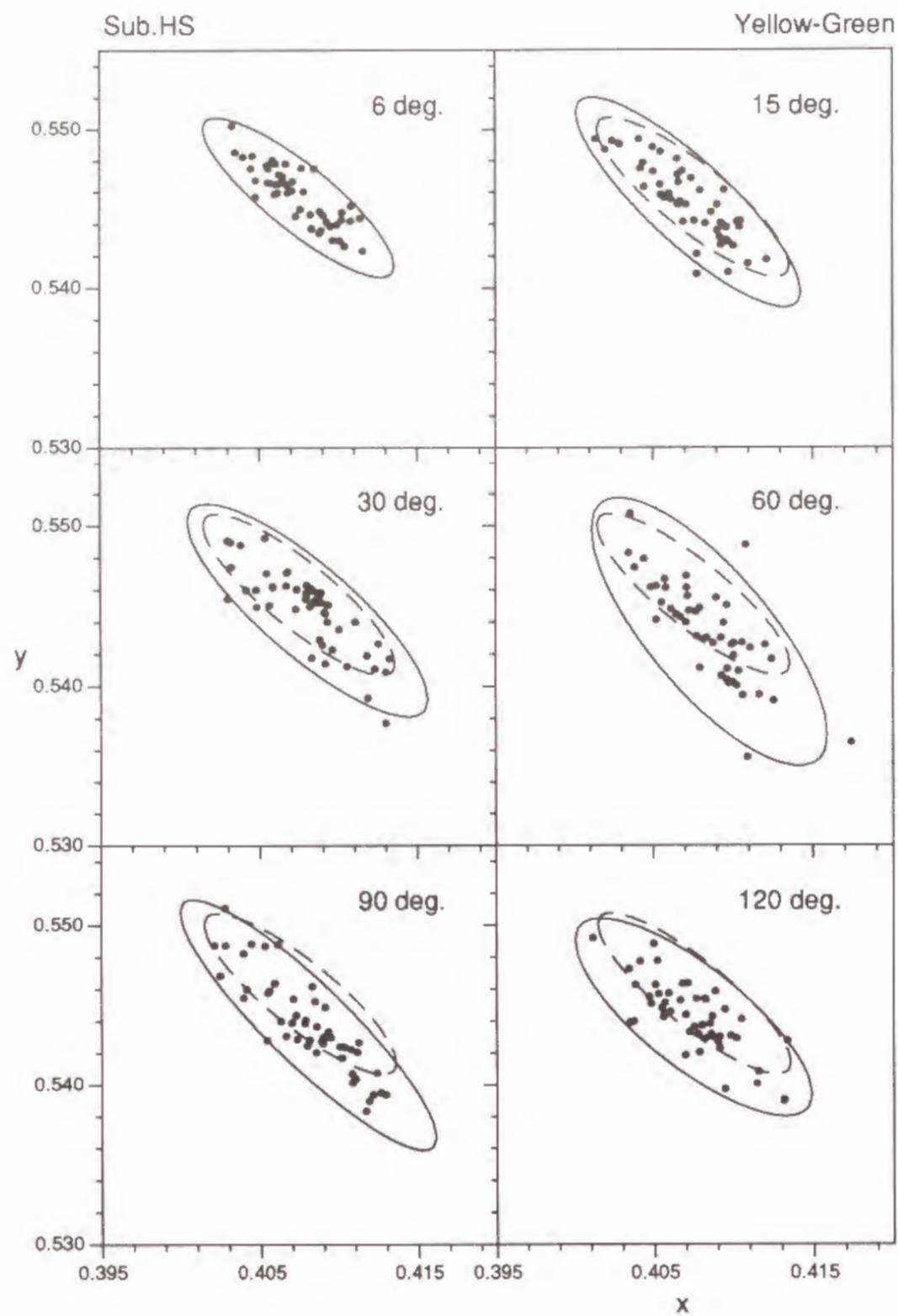


図3-4 被験者HSによる参照刺激Yellow-Greenに対する等色楕円体。黒点：等色点のxy色度図平面への投影、実線：中心を通る等輝度断面での楕円。比較のため刺激間隔6°での楕円を破線で描いた。

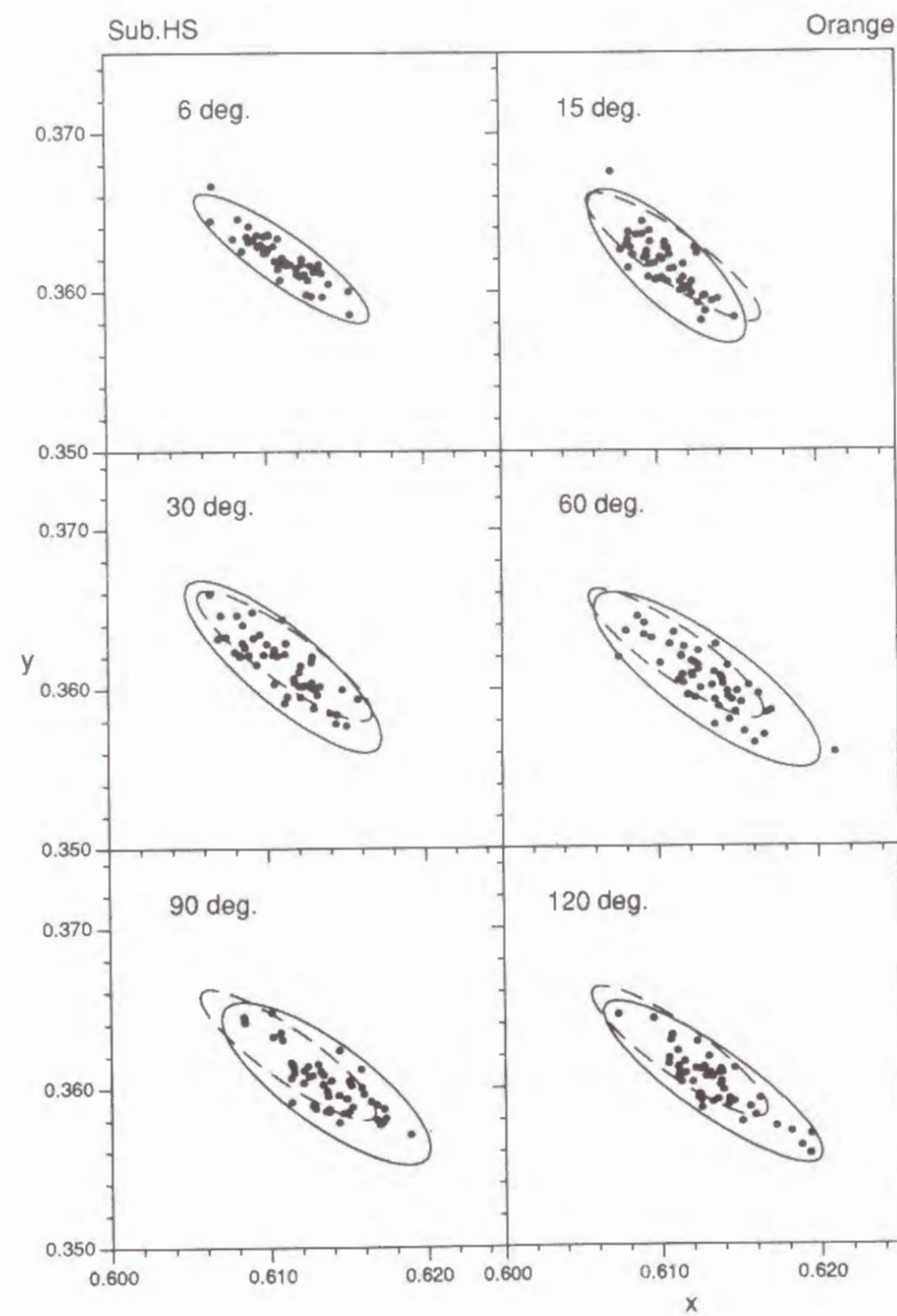


図3-5 被験者HSによる参照刺激Orangeに対する等色楕円体。

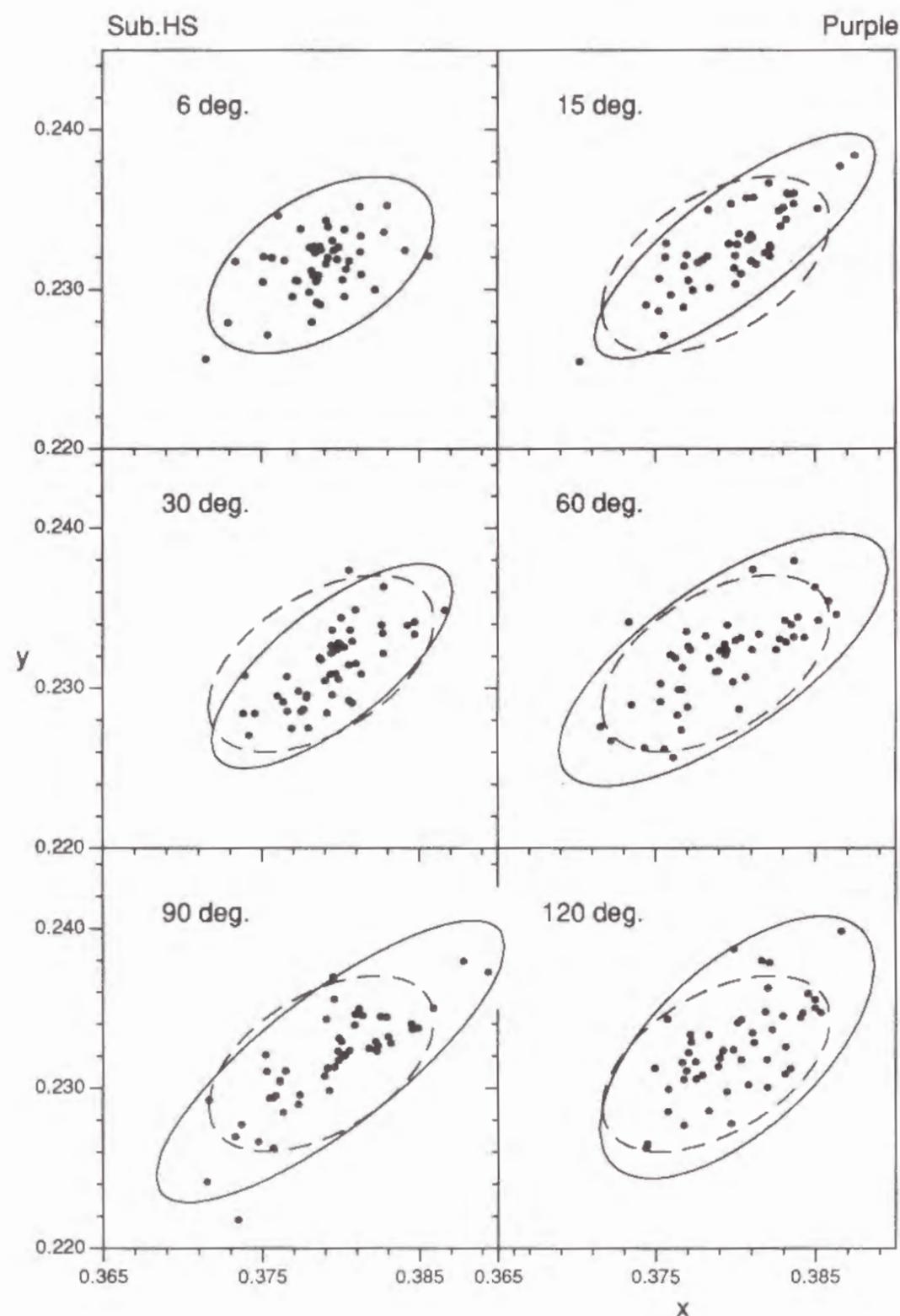


図3-6 被験者HSによる参照刺激Purpleに対する等色楕円体。

等色楕円体は複数のセッションにまたがって行われる等色に基づいて決定される。このときセッション間のばらつきが反映されないようにデータ処理(2.1.3参照)をしているが、この効果についても触れておく。図3-7において、ブロック処理を施した場合(実線)と施さない場合(破線)の等色楕円体の比較を行った。いずれも破線よりも実線の楕円の方が小さい、特に刺激間隔6°での違いが顕著である。破線の楕円の方が刺激間隔による大きさの変化が小さく、もしブロック処理を施していなかったら、刺激間隔の効果が過小評価されていたであろうことを示している。また楕円の方向の変化も見られ、特にPurpleにおいては実線と破線の楕円ではかなり違った印象を受ける。

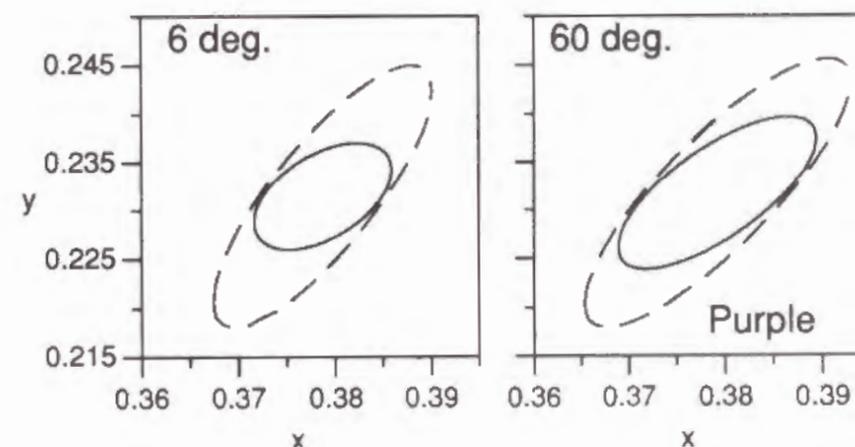


図3-7 等色点のブロック毎の平行移動によるデータ処理(2.1.3参照)の効果。参照刺激Purple、被験者HS、刺激間隔6°(左グラフ)と60°(右グラフ)。実線:データ処理を施したときの等色楕円(図3-6に同一のもの)、破線:データ処理なしの場合。

刺激間隔の関数としての等色楕円体の体積 $V$ 、楕円断面積 $A$ 、輝度方向の径 $dY$ を図3-8に示した。いずれも縦軸は間隔6°の値( $V_6$ 、 $A_6$ 、 $dY_6$ )に対する相対値とした。また $(V/V_6)^{1/3}$ 、 $(A/A_6)^{1/2}$ とすることで次元を揃えている。被験者HSの $(V/V_6)^{1/3}$ では3参照刺激に対するグラフはほぼ重なっている。60°付近までは上昇、それ以上では緩やかに下降している。 $(A/A_6)^{1/2}$ ではPurple以外は同様の傾向を示している。Purpleでは30°までは一定、30~60°で上昇し、それ以降でまたほぼ一定となっている。 $dY/dY_6$ では $(V/V_6)^{1/3}$ や $(A/A_6)^{1/2}$ に比べると3曲線の一致は悪いが、凸形をしている点では共通している。一方被験者TIではHSに比べて凹凸が激しい。これは等色回数が30回とHS(50回)に比べて少ないのと、この色彩計での等色の経験が浅いことが原因と考えられる。しかし全般的には右上がりの傾向が見られ、刺激が離れると等色精度が低下することを示している。またHSと同様に $dY/dY_6$ での3曲線の一致は悪い。

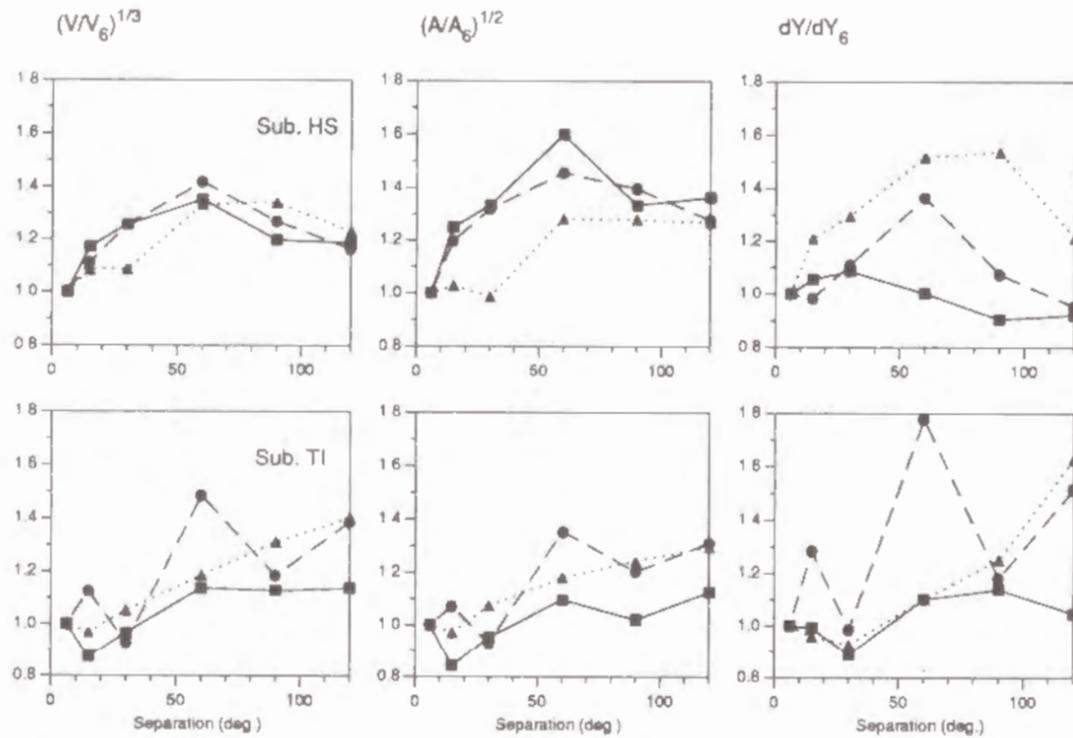


図3-8 刺激間隔に対する等色楕円体の変化。被験者HS（上段）、TI（下段）。楕円体体積の立方根 $(V/V_6)^{1/3}$ （左列）、等輝度断面の楕円面積の平方根 $(A/A_6)^{1/2}$ （中央列）、楕円体の輝度軸方向の径 $dY/dY_6$ （右列）。 $V_6$ 、 $A_6$ 、 $dY_6$ は刺激間隔 $6^\circ$ の値。  
■：Yellow-Green、●：Orange、▲：Purple。

両被験者とも $(V/V_6)^{1/3}$ 、 $(A/A_6)^{1/2}$ 、 $dY/dY_6$ となるにしたがって曲線間のばらつきが大きくなっている。これは装置の再現性が輝度方向に関して悪いとか、視覚系において輝度弁別が色度弁別メカニズムに比べて不安定であるということの意味しているわけではない。値のばらつきは楕円体方向のばらつきを反映しているのである。 $dY$ 値は楕円体の方向によって大きく変化するが、楕円面積 $A$ は色度平面内での楕円方向が変化しても値は変わらない。さらに体積 $V$ は楕円体の3次元的な方向変化に全く影響されない。

3参照刺激に対する相対値を平均し、図3-9に示した。 $(V/V_6)^{1/3}$ に関して、HSでは $60^\circ$ まで上昇、その後緩やかに下降している。TIでは $30^\circ$ までは一定、 $30^\circ \sim 60^\circ$ で上昇しそれ以降でまたほぼ一定となっている。両被験者で $60^\circ$ までの上昇開始位置は異なるが、 $60^\circ$ 前後で傾きが変化している点では共通している。 $60^\circ$ までの上昇が大きく、それ以降での変化が小さい。 $(A/A_6)^{1/2}$ では値自体は被験者間に多少差が見られるが、傾向は $(V/V_6)^{1/3}$ と同様である。 $dY/dY_6$ のグラフでは $60^\circ$ 以上での変化が $(V/V_6)^{1/3}$ 、 $(A/A_6)^{1/2}$ に比べて大きい、 $60^\circ$ 以下での上昇は $(V/V_6)^{1/3}$ 、 $(A/A_6)^{1/2}$ と似ている。以上の結果を総合すると、「等色精度は刺激間隔に伴って低下している。しかし変化は単調ではない。 $60^\circ$ までの低下が大きく、それ以降での変化が小さい。」とすることができる。

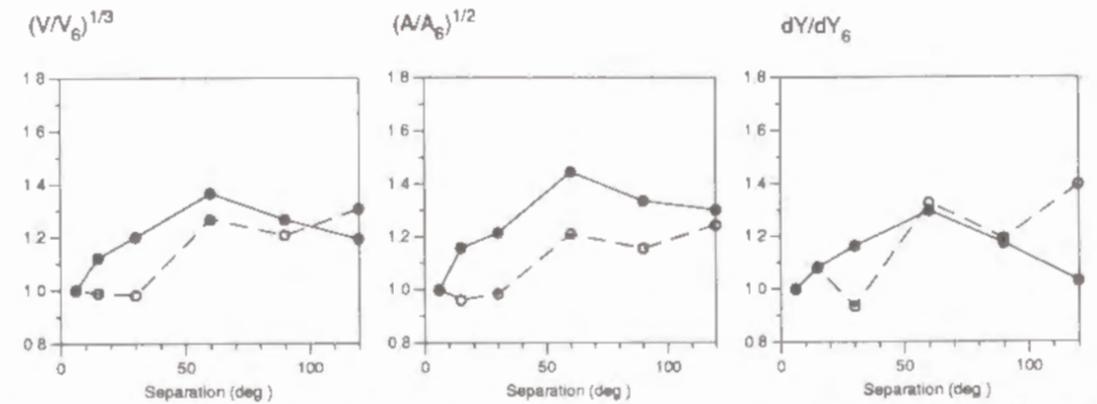


図3-9 3参照刺激について平均した相対値。楕円体体積の立方根 $(V/V_6)^{1/3}$ （左図）、楕円面積の平方根 $(A/A_6)^{1/2}$ （中央図）、楕円体の輝度方向の径 $dY/dY_6$ （右図）。●：被験者HS、○：TI。

(iii) 刺激間隔 $6^\circ$ と $120^\circ$ における等色楕円体

刺激間隔が $6^\circ$ と $120^\circ$ における全被験者の等色楕円体の体積 $V^{1/3}$ 、楕円断面面積 $A^{1/2}$ 、輝度方向の径 $dY$ の値、およびそれらの比を表3-3に示す。各行、各列の最後にある比の平均はその方向の単純平均である。

表3-1 全被験者に対する $6^\circ$ と $120^\circ$ での等色楕円体の体積、楕円面積、輝度方向の径。

Sub.	Sep.(deg.)	Yellow-Green			Orange			Purple			Average		
		$V^{1/3}$	$A^{1/2}$	$dY$	$V^{1/3}$	$A^{1/2}$	$dY$	$V^{1/3}$	$A^{1/2}$	$dY$	$V^{1/3}$	$A^{1/2}$	$dY$
KK	6	0.1704	0.0095	38.0939	0.0773	0.0064	7.9138	0.1532	0.0131	15.5103			
	120	0.2294	0.0130	50.5023	0.1044	0.0098	8.6186	0.1523	0.0149	10.2581			
	ratio	1.3467	1.3721	1.3257	1.3509	1.5258	1.0891	0.9941	1.1376	0.6614	1.2306	1.3452	1.0254
KS	6	0.1320	0.0061	40.7949	0.0844	0.0078	7.3005	0.0959	0.0080	8.1585			
	120	0.2059	0.0106	52.6622	0.1048	0.0093	9.7493	0.1236	0.0095	14.2515			
	ratio	1.5593	1.7227	1.2909	1.2405	1.1997	1.3354	1.2891	1.1901	1.7468	1.3630	1.3708	1.4577
NM	6	0.1291	0.0080	24.9115	0.0696	0.0056	6.8838	0.0656	0.0059	5.7720			
	120	0.1271	0.0085	19.1948	0.0911	0.0087	6.8878	0.1203	0.0122	6.4558			
	ratio	0.9841	1.0619	0.7705	1.3101	1.5647	1.0006	1.8330	2.0880	1.1185	1.3758	1.5715	0.9632
HS	6	0.1201	0.0070	24.8930	0.0670	0.0057	6.6719	0.0988	0.0104	6.2924			
	120	0.1425	0.0095	22.9493	0.0781	0.0073	6.3535	0.1217	0.0132	7.6442			
	ratio	1.1867	1.3635	0.9219	1.1644	1.2775	0.9523	1.2319	1.2686	1.2148	1.1943	1.3032	1.0297
TI	6	0.1928	0.0122	33.7972	0.1215	0.0127	7.7279	0.1522	0.0146	12.4677			
	120	0.2194	0.0137	35.3707	0.1686	0.0166	11.7172	0.2134	0.0189	20.2975			
	ratio	1.1377	1.1265	1.0466	1.3877	1.3117	1.5162	1.4025	1.2981	1.6280	1.3093	1.2454	1.3969
Average		1.2429	1.3293	1.0711	1.2907	1.3759	1.1787	1.3501	1.3965	1.2739	1.2946	1.3672	1.1746

値自体は個人差が大きく、例えば6° Yellow-Greenの $A^{1/2}$ では最小値はKSの0.0061、最大値はTIの0.0122と2倍近くの差がある。この個人差の原因について検討するために、図3-10(a)に各被験者に対する $A^{1/2}$ の値をプロットした。

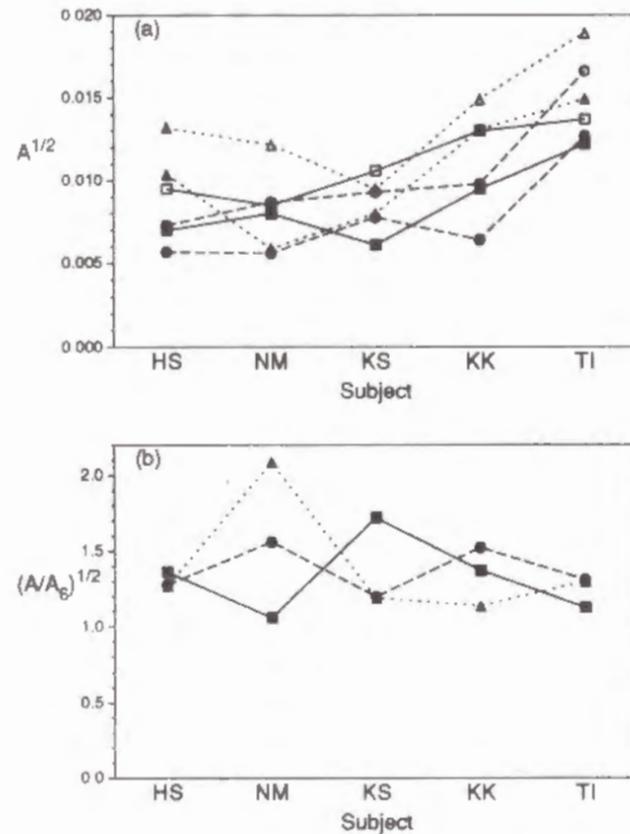


図3-10 刺激間隔6°、120°における全被験者の等色楕円面積。(a)楕円面積 $A^{1/2}$ 、■: 参照刺激Yellow-Green 刺激間隔6°、□: Yellow-Green 120°、●: Orange 6°、○: Orange 120°、▲: Purple 6°、△: Purple 120°。(b) $(A/A_0)^{1/2}$ 、■: 参照刺激Yellow-Green、●: Orange、▲: Purple。

被験者HS、NMは本装置での等色作業経験が最も豊富で、次いでKS、そしてKKとTIは本実験が初めてである。したがって横軸の並び順が本装置による等色作業の習熟度にほぼ対応している。見て分かるとうりKK、TIの値が他の被験者に比べて大きく、等色精度自体は被験者の習熟度がかなり影響すると考えられる。一方、図3-10(b)は6°と120°での $A^{1/2}$ 値の比を示したグラフであるが、(a)のように被験者による差が明確ではなく、比に関しては特に習熟度の影響はない。等色回数の多い被験者HS、TIの方が、他の被験者に比べて値のばらつきは小さいが、平均するとほぼ等しい値になる。 $A^{1/2}$ 比はすべて1以上で楕円面積増大、つまり色度弁別能は刺激間隔の増大に伴って低下する傾向は被験者に依らず同じである。

それに対し表3-3に戻ってdY比を見てみると、1以下の値もあり、輝度弁別能が上昇している場合もあることに気付く。被験者別に見るとKK、NM、HSはdY比の平均で各々1.03、0.96、1.03倍となっており、dYの増大が見られない。一方被験者KSやTIでは $A^{1/2}$ 比よりもdY比の方が大きい値をとっており、弁別閾値の上昇は色度図上よりも輝度方向に大きい。全被験者、全参照刺激に対し比を平均すると、 $A^{1/2}$ 比は1.37、dY比は1.17、 $V^{1/3}$ 比は1.29となる。

#### (iv) 隣接条件と大ギャップ条件での等色精度の比較

Sharpe and Wyszecki(1976)の等色楕円体では刺激間ギャップが0°~4.1°と変化したとき色度図上で1.54倍、輝度軸方向に1.62倍となっている。これと比較すると今回の範囲での弁別閾値の上昇はそれほど大きくないと言える。また「6°に比べると120°での色比較は非常に難しい」という内観報告が全被験者から得られているにもかかわらず、等色精度にはあまり反映していないように思われる。

刺激間隔6°はギャップ4°に相当するので、本実験とSharpe and Wyszecki(1976)の結果から、ギャップが0°~118°と増大するときの弁別閾値の変化を概算してみよう。厳密には背景が異なる(Sharpe and WyszeckiではマンセルN6のグレイ、本実験は暗黒)ので補正が必要であるが、ここではそれを無視しておおよその値を計算する。色度弁別閾では0°~4°で1.54倍(Sharpe and Wyszecki)、4°~118°で1.37倍(本実験)より、0°~118°で $1.54 \times 1.37 = 2.1$ 倍になる。また輝度弁別閾では $1.62 \times 1.17 = 1.9$ 倍となる。したがって2刺激が隣接している場合と比べて、大きなギャップがある場合(視点移動に頭部の回転を必要とするほど離れている)では弁別閾は約2倍になっていることになる。換言すれば大きなギャップ条件では知覚される色差は約1/2の大きさになると考えても良い。

#### 3.1.4 まとめ

刺激間隔を6°~120°で変化させたときの等色点のばらつきをバーンナムタイプの色彩計を用いて測定した。ばらつきを楕円体で近似し、体積、等輝度断面の楕円面積、輝度方向の厚みを比較した。体積、等輝度断面面積、輝度軸方向の厚みは間隔の増大に伴って僅かに大きくなっていったが、変化は単調ではなく60°付近を境に傾きが変化していた。120°での等色精度は6°に対して、色度図上で1.37倍、輝度軸方向に1.17倍低下していた。

## 3.2 実験2：低輝度刺激に対する等色の繰り返し精度

### 3.2.1 実験目的

実験1での等色作業は自由等色であり、等色完了までの制限時間や1回の注視時間等は決められていなかった。被験者にとっては刺激間隔が離れている以外は、最も良い作業環境が与えられていた。この章と次の章ではより劣悪な条件を付加し、それによって刺激間隔と等色精度の関係が変化するかどうか検討する。

Brown(1951)は低輝度での色弁別能力を調べるため、 $7 \sim 0.0259$  ft L (foot Lambert、1ft Lは $3.426 \text{cd/m}^2$ に相当)の刺激に対して等色楕円体を導出している。結果は輝度弁別能、色度弁別能ともに1ft L以下での急激な低下を示していた。また等色楕円体の等輝度面での楕円は、低輝度においてはすべて第三色覚異常(tritanopia)の混同色線(confusion line)の方向に揃っていた。つまり、色覚正常者でも低輝度においては疑似的に第三色覚異常になることを示していた。このように、低輝度刺激での等色作業では等色精度が低下するだけでなく、特性も通常と異なっている。

1.2.3 (iii) 現行色差式の問題点の章でも述べたが、CIEのTC1-28では、様々な刺激条件での色差知覚や色弁別特性について検討し、個々の条件変化に対して幾つかの補正係数を提案している。同時に複数の条件変化があるときは少し話が複雑であり、条件間の相互作用を考えなければならない。しかし、もし各々の条件変化が視覚系の色弁別メカニズムに対して独立に影響を及ぼしているならば、全体の補正係数は個々の補正係数の積で表わすことができる。したがって刺激間隔と等色精度の関係が刺激輝度に依らず不変であれば、刺激輝度と刺激間隔の等色精度に与える影響は独立と見做すことができ、応用的にも補正係数の扱いが簡単になる。

### 3.2.2 実験

#### 装置

刺激呈示装置は実験1と基本的に同じである(図2-5、2-6参照)。ただし、低輝度の刺激を実現するために、等色刺激、参照刺激呈示装置の双方に中性濃度フィルター(NDフィルター)を組み込んでいる。参照刺激呈示装置ではF4とIB2の間に、等色刺激呈示装置ではIB1の入射側拡散ガラスの手前にNDフィルターを設置した。NDフィルターは入射光の波長に依らないような透過率をもっているため、色度を変えずに光量のみを減らすことができる。今回は透過率0.01のフジフィルム社NDフィルター、ND-2.0を使用して、約1/100の輝度を実現した。尚、このフィルターの分光透過率は付図A-3に記載した。また装置座標系

(H, V, W)から色度と輝度(x, y, Y)への変換には付録1記載の較正(II)の(A2)式を用いた。

#### 実験条件

参照刺激は1種類。色相はOrangeであるが、実験1で用いたものよりも彩度が低く、語尾にLS(Low Saturation)を付してOrange(LS)と表記する。色フィルターはフジフィルム社のCC-R50とND-0.7を重ねて用いた。分光透過率は付図A-2に示す。またミノルタ社製CS-100による測色値(x, y, Y)は(0.526, 0.380,  $47.0 \text{cd/m}^2$ )であった。低輝度条件では透過率0.01のNDフィルターにより、実際はおおよそ1/100の輝度( $0.47 \text{cd/m}^2$ )になっている。刺激間隔は(中心間の距離)は $6^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ の3条件である。刺激から被験者までの距離は約50cmで、参照刺激、等色刺激の大きさは共に1.8cm(視角にして約 $2^\circ$ )の正方形である。ブース内照明はなく、周辺は暗黒となるため刺激は開口色モードの見えとなる。

#### 手続き

手続きは実験1と同様である。ただし、1ブロックは10回の等色とし、1セッションは1ブロックのみの等色とした。1セッションの所要時間は20分以内となる。

#### 被験者

被験者は、男性HS(27才)、実験1参加者の内の1名である。

### 3.2.3 結果と考察

全等色データは(H, V, W)から(x, y, Y)へ変換され、95%の等色楕円体が導出される。低輝度条件では約1/100の輝度になっているが、結果はすべてNDフィルターを挿入しない状態での輝度、色度の計算値で表示する。図3-11に全等色点の分布と95%等色楕円体を示す。図の左側のグラフがNDフィルターなしでの等色、右側のグラフがNDフィルターありでの等色結果である。黒点は等色点のxy色度平面への投影点、実線の楕円は95%楕円体の中心を通る等輝度断面を示している。刺激間隔 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ のグラフには刺激間隔 $6^\circ$ での等色楕円を破線で表示した。また右側のグラフではNDフィルターなしでの等色楕円を点線で描いた。

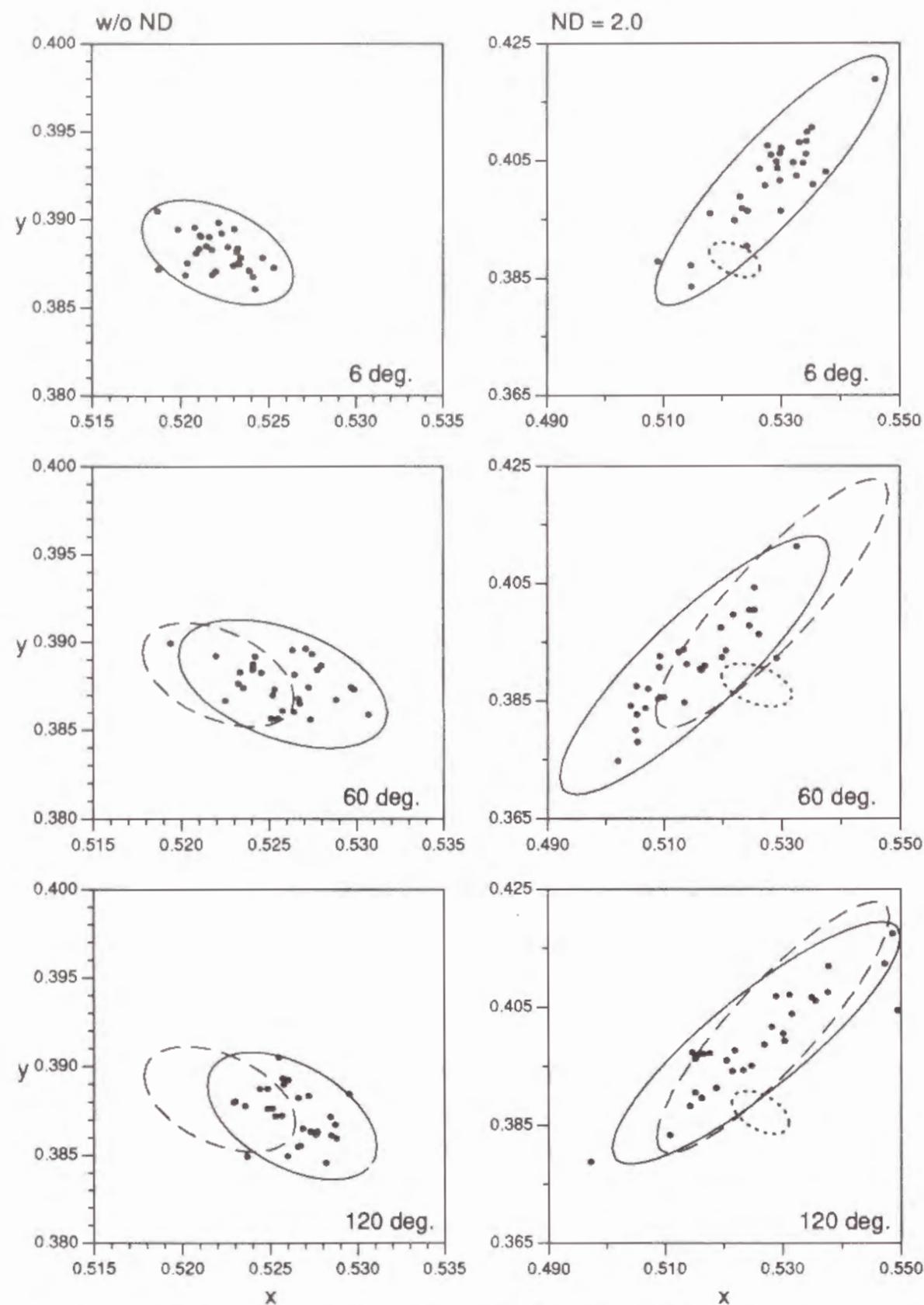


図3-11 被験者HSによる参照刺激Orange(LS)に対する等色楕円体。左側グラフ：NDフィルタなし、右側グラフ：NDフィルタあり。黒点：等色点のxy色度図平面への投影、実線：中心を通る等輝度断面での楕円。比較のため刺激間隔6°での楕円を破線で描いた。右側グラフでの点線の楕円は同一刺激間隔におけるNDフィルタなしでの楕円。

左側のグラフからは実験1と同様の傾向が観察される。つまり、刺激間隔6°の楕円が最も小さく、刺激間隔60°で最も大きい。刺激間隔60°、120°の中心の位置は6°に比べて、x増加、y減少の方向に移動している。右側グラフではやはり刺激間隔6°での等色楕円が最小になっているが、NDフィルタなし条件と比較するとその変化は小さい。

右側グラフにおいて、実線の楕円は点線のそれ（NDなし）に比べるとかなり大きいことが分かるが、これは低輝度刺激での大きな色弁別能力の著しい低下を示している。さらに楕円の中心位置や方向も異なっている。中心位置に関しては、参照刺激と等色刺激で異なる分光透過率の色フィルタを用いており、またNDフィルタの分光特性も完全にフラットにはなっていないため、NDフィルタの挿入によりメタメリックに等色する位置がずれたと解釈できる。しかし楕円方向の変化は低輝度での色知覚特性をよく反映している。図3-12は等色楕円の方向と、第三色覚異常の混同色線を比較したものであるが、NDフィルタあり、つまり低輝度での等色楕円の方向が見事に第三色覚異常の混同色線に一致している。これはBrown(1951)でも報告されているように、低輝度刺激では、疑似的に第三色覚異常になることを示している。

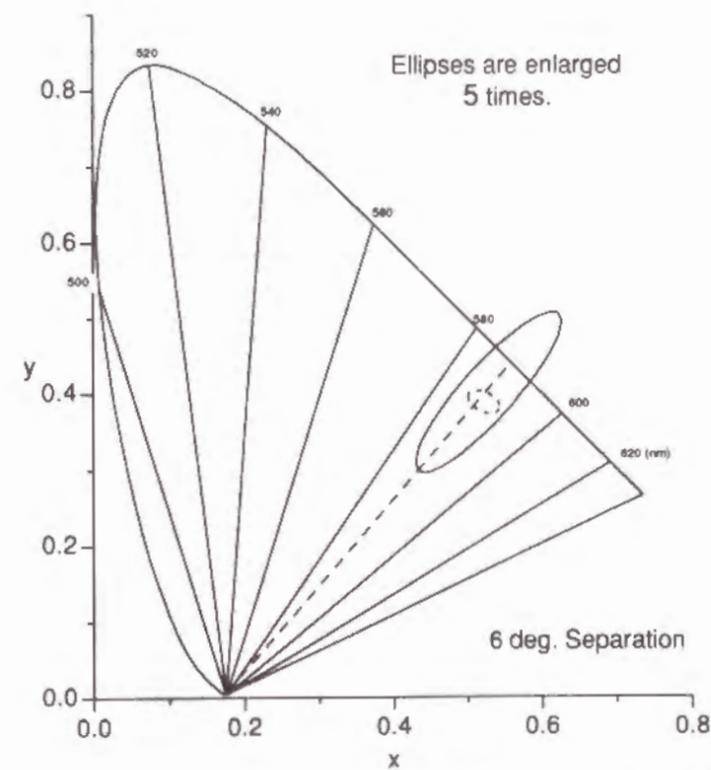


図3-12 等色楕円の方向と第三色覚異常者の混同色線の比較。刺激間隔6°での等色楕円を5倍に拡大して表示した。実線：NDフィルタあり、破線：NDフィルタなし。直線は混同色線を示している。

次に図3-13(a)に、等色楕円体の体積の立方根 $V^{1/3}$ 、中心を通る等輝度断面の楕円面積の平方根 $A^{1/2}$ 、輝度方向の径 $dY$ の刺激間隔に対する変化を示す。いずれのグラフも○がNDフィルタなし、●がNDフィルタありの結果を示している。上段の $V^{1/3}$ ではNDフィルタありの低輝度条件はNDフィルタなし条件に比べて、全体的に約2.5倍高い値を示している。しかし刺激間隔に対する変化は良く似ている。中段 $A^{1/2}$ でも $V^{1/3}$ 同様、低輝度での色度弁別能の著しい低下（全体的に3.5~4倍の楕円面積の上昇）を示しているが、刺激間隔に対する変化はほとんど差がない。下段グラフの $dY$ は、NDフィルタありの60°条件だけが大きな値をとっているが、他の条件ではフィルタの有無の影響はほとんど見られない。したがって低輝度による輝度弁別能の低下はないと言える。ここで注意しておかなければならないのは、NDフィルタあり、つまり実線で示される $dY$ 値は実際は約1/100の値になっているということである。しかし、輝度値 $Y$ に対する比 $dY/Y$ のグラフは、縦軸の値は異なるが図3-13(a)の下段と相似形のグラフになるはずである。Brown(1951)の実験結果では、約0.1ft-L (=0.3426cd/m<sup>2</sup>)以下で $dY/Y$ が急激に上昇しており、本実験の低輝度条件は約0.47cd/m<sup>2</sup>であることから、さらに輝度を下げれば輝度弁別能が上昇するものと予想される。

図3-13(b)では刺激間隔6°に対する相対的な等色精度の変化を示した。実線は本実験結果で、比較のため実験1の被験者HSの結果を点線で表示した。 $(V/V_6)^{1/3}$ においては、NDフィルタなし条件の曲線は実験1の曲線と良く一致している。NDフィルタあり条件では僅かに低い値を示しているが、傾向は同じである。 $(A/A_6)^{1/2}$ でもNDフィルタなし条件では実験1の結果と同じ傾向を示している。ただ、やはり低輝度条件では刺激間隔60°、120°での上昇は他と比較して小さい。 $dY/dY_6$ でも曲線のばらつきこそ大きい凸型の形状という点では一致している。以上から、低輝度条件では色度弁別能力自体は低下するが、刺激間隔の影響の現れ方は通常輝度条件と変わらないと言える。つまり色弁別においては、刺激輝度と刺激間隔という2つの条件は独立に扱うことができる。

ここで被験者の内観報告についても述べておく。図3-12や図3-13(a)が示す通り、低輝度条件ではかなりの色弁別能の低下が起きている。しかし被験者は「作業自体は、低輝度刺激でもほとんど苦痛、ストレスを感じない」と報告している。低輝度においては各々の刺激の色の見え自体が曖昧で、両刺激が同じに見える、あるいは違いが分からない領域が広がっているために弁別能力が低下したと考えられる。それに対し刺激間隔が広い状況では、個々の刺激の見え自体ははっきりしているが、比較が記憶での作業となるため弁別能力が低下すると考えられる。明瞭な色の見えを、比較作業に反映させることができないというギャップが被験者にとってはジレンマとなり、作業中の大きなストレスの原因となるのであろう。以上の事実は、等色精度は作業の難しさの印象に必ずしも対応しないことを意味する。等色作業の難しさの印象は、条件変化が色弁別機構のどのレベルに影響しているかを表している。

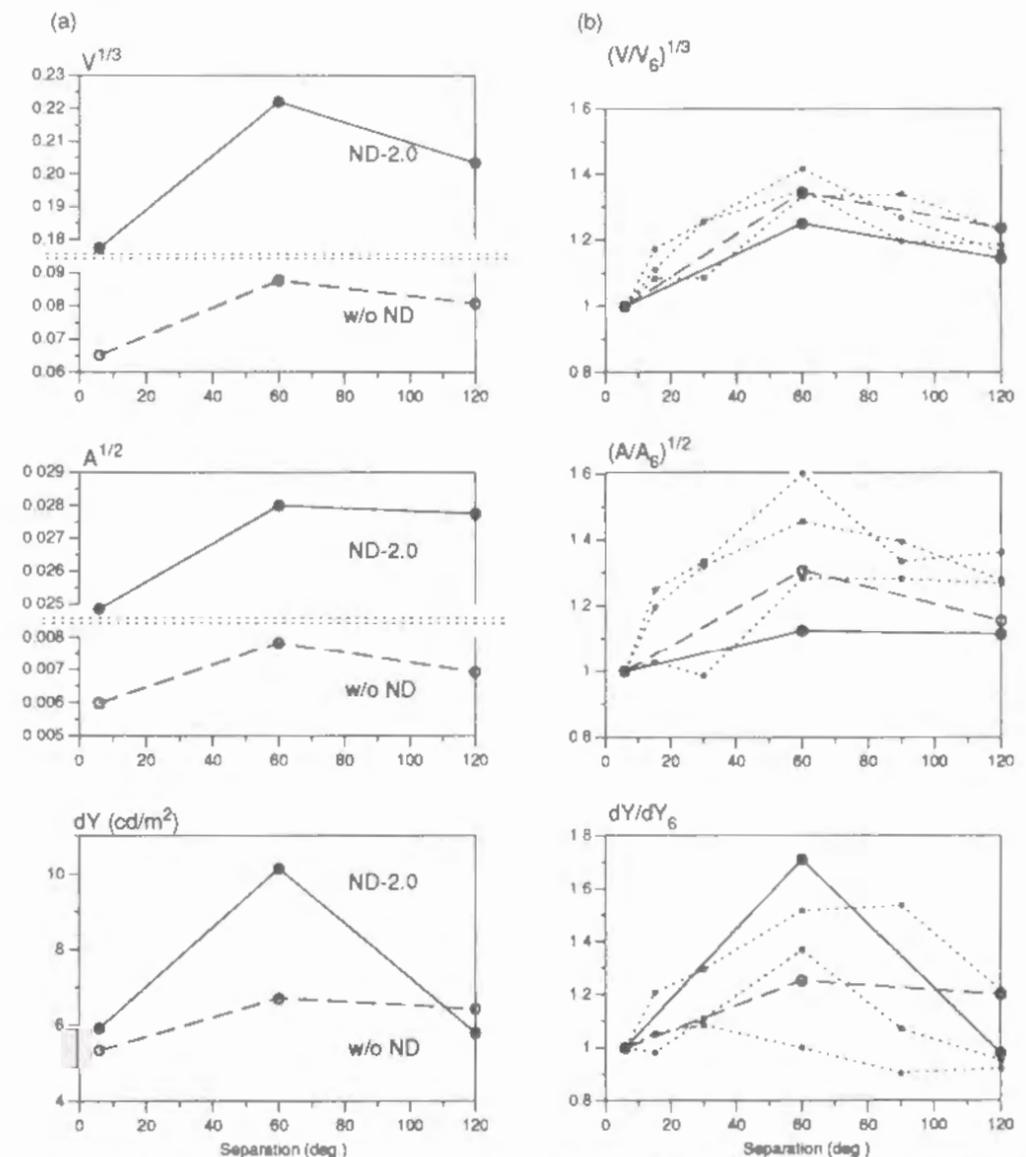


図3-13 刺激間隔に対する等色楕円体の変化。(a) 絶対値 $V^{1/3}$ 、 $A^{1/2}$ 、 $dY$ 。(b) 刺激間隔6°の値に対する相対値 $(V/V_6)^{1/3}$ 、 $(A/A_6)^{1/2}$ 、 $dY/dY_6$ 。実線：NDフィルタなし、破線：ND-2.0あり。比較のために実験1の被験者HSの結果（図3-8の上段グラフ）を点線で示した。

### 3.2.4 まとめ

装置光路途中にNDフィルタを挿入することにより、フィルタ未挿入時の約1/100の低輝度条件（約0.47cd/m<sup>2</sup>）を実現し、低輝度刺激における、刺激間隔変化に対する等色の繰り返し精度変化を測定した。輝度弁別能の低下は見られなかったが、xy色度平面での等色楕円は1次元方向で約3.5~4倍の大きさになり、色度弁別能力の著しい低下が観察された。また楕円長軸も第三色覚異常の混同色線の変化した。しかし刺激間隔に対する相対的な変化は低輝度でも変わらず、刺激間隔と刺激輝度の条件変化は、視覚系の色弁別メカニズムに対して独立に影響していることを示している。

### 3.3 実験3：制限時間内の等色における繰り返し精度

#### 3.3.1 実験目的

生産ラインにおいて製品の色ずれの日視検査をする場合は、色差判定や色弁別作業を素早く行なう必要がある。じっくり観察する場合に比べて、明らかに弁別閾は大きくなるであろう。このように観察や作業にかかる時間によって、色弁別能力は影響をうけることが予想される。CIEのTC1-28では特に取り上げられていないが、色弁別や等色作業時の制限時間は被験者の心理状態にも影響するため、弁別能や等色精度の重要なパラメータと考えられる。そこで本実験では時間制限化の等色において、等色精度に与える刺激間隔の影響を測定する。

時間が制限されているときは、等色精度は等色開始時の設定（等色刺激の色）によって大きく影響される。そこで開始時の等色刺激の色を常に白に設定した場合（実験3-1）と、様々な色に設定から始める場合（実験3-2）の2条件で実験を行なった。

#### 3.3.2 実験

##### 装置

刺激早示装置は実験1と基本的に同じ（図2-5、2-6参照）であるが、呈示時間を制御するためのシャッタ、およびタイマ部が増設されている。シャッタは、それぞれ色彩計中のウェッジフィルタ直前、参照刺激呈示装置中の色フィルタ手前に配置されている。（H, V, W）から（x, y, Y）への変換には付録1記載の校正（III）、（A-3）式を用いている。

##### 実験条件

###### （実験3-1）

参照刺激は3種類。1つは実験2で用いたOrange(LS)、残りは低彩度のYellow-Green(LS)、Purple(LS)である。色フィルタは、Yellow-Green(LS)がCC-B50とCC-G50を2枚、Purple(LS)はCC-50Bを2枚重ねて用いた。すべてフジフィルム社の色フィルタである。分光透過率は付図A-2に示した。また実験終了時におけるミノルタ社製CS-100による測色値（x, y, Y）を表3-4にまとめて示した。刺激間隔（中心間の距離）は6°、60°、120°の3条件。時間制限がある場合は作業開始時の設定をコントロールしておく必要があるが、本実験では白色の刺激に着色してゆく状況を模擬することを意図して、等色開始時の色彩計の設定は（H, V, W）=（660, -205, -500）の白色刺激とした。表3-5、図3-14で示すところの設定10である。実験1、2の時間無制限の等色では、

作業完了までにおよそ1～2分の時間を要していたが、そのほとんどは微調整のための時間であった。本実験では粗い等色だけで微調整はできないように、制限時間を15秒間に設定した。

###### （実験3-2）

操作上の学習効果の影響を避けるため、等色開始時の色彩計の設定は10種類に増やした。この初期設定時の等色刺激は、xyY色空間において3参照刺激を囲むように位置している。装置座標（H, V, W）および計算値（x, y, Y）は表3-5と図3-14に示す。10種類の初期設定は1ブロックで1回ずつになるように、実験者がランダムな順序で設定する。制限時間は、実験3-1と同様の理由により20秒間に設定した。それ以外の条件は実験3-1と同様である。

表3-4 実験2および3-1、3-2で用いた参照刺激の測色値（CIE1931xy色度、輝度）。

References	x	y	Y(cd/m <sup>2</sup> )
Orange(LS)	0.526	0.380	47.0
Yellow-Green(LS)	0.362	0.501	71.7
Purple(LS)	0.355	0.291	52.8

表3-5 実験3-1および3-2の初期設定値と測色値。

No.	H	V	W	x	y	Y(cd/m <sup>2</sup> )
1	210	-750	-1200	0.652	0.338	39.8
2	810	-750	-1200	0.372	0.602	56.1
3	210	-150	-1200	0.366	0.179	4.7
4	810	-150	-1200	0.249	0.262	6.4
5	660	-205	-1200	0.330	0.322	10.2
6	210	-750	-500	0.649	0.340	295.2
7	810	-750	-500	0.369	0.605	429.7
8	210	-150	-500	0.365	0.181	35.5
9	810	-150	-500	0.249	0.265	50.3
10	660	-205	-500	0.327	0.325	78.6

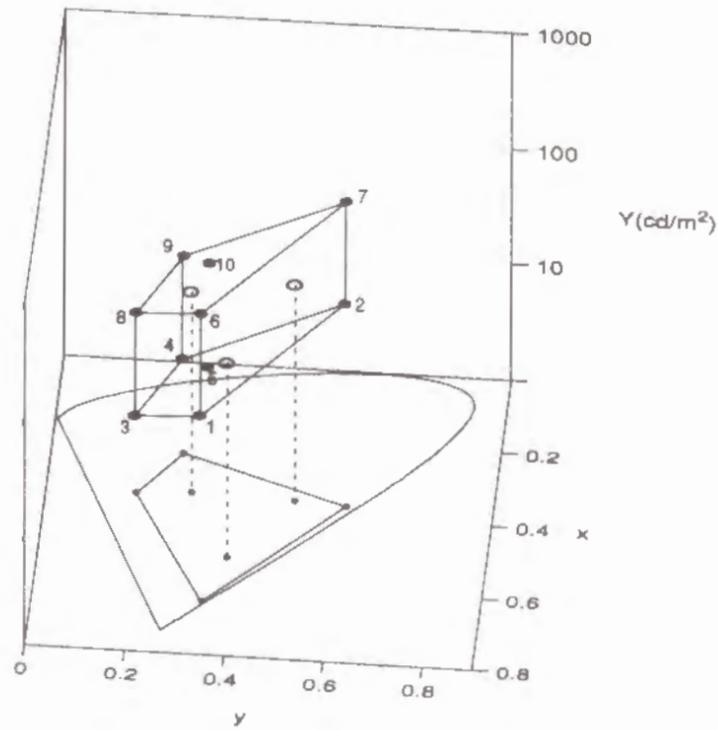


図3-14 実験3-1および3-2の初期設定（計算値）と参照刺激（測光値）。

### 手続き

#### （実験3-1）

被験者は数分間の暗順応をする。実験者は刺激の間隔を $6^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $120^\circ$ のいずれかに設定する。さらに等色を始める前に色彩計を、 $(H, V, W) = (660, -205, -500)$ の白色に設定しておく。被験者がスイッチを押すとシャッターが開き、参照刺激と白色の等色刺激が呈示される。被験者は必要に応じて眼球、頭部回転運動による視点移動をしながら2つの刺激を両眼で観察し等色する。15秒経過するとシャッターが自動的に閉じるので、実験者は $(H, V, W)$ の値を記録し、次の等色作業に備えて色彩計を白色に設定する。被験者はシャッターのスイッチを押して次の等色を開始する。等色は続けて10回繰り返し、これを1ブロックとする。1ブロックの等色が終了したら参照刺激を取り替えて同様の作業を行う。3参照刺激に対する等色がすべて終わったら実験を終了する。1セッション内では刺激間隔は一定としておく。

#### （実験3-2）

基本的に実験3-1と同様である。暗順応後、実験者は10種類の初期設定のうちから一つを適当に選んで設定する。すべての初期設定に対し1回ずつ等色したら1ブロック終了。このときの順序はランダムになるように実験者が適当に

選択する。セッション中は、刺激間隔は一定とし、3参照刺激に対して1ブロック（各初期設定に対し1回ずつ、10回）ずつの等色を行なう。制限時間は20秒。

### 被験者

被験者は、実験1および2に参加していたHS（男性、27才）1名である。

### 3.3.3 結果と考察

#### （実験3-1）

全等色点と95%等色楕円体を図3-15に示す。図3-11と同じようにxy色度平面上での等色楕円を表示する。時間制限なし条件との比較のため実験2の参照刺

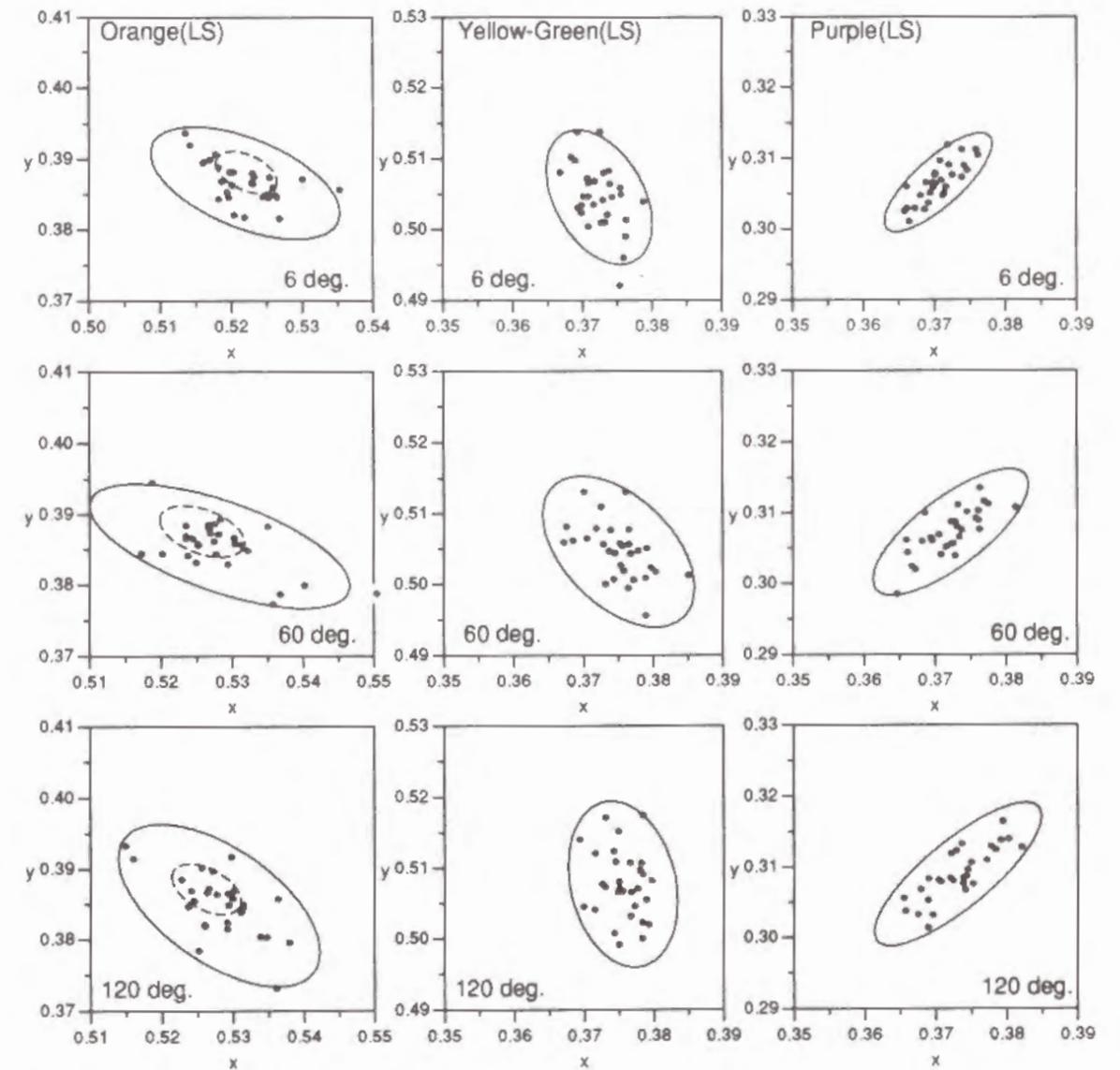


図3-15 全等色点と95%等色楕円体。実線：楕円対中心を通る等輝度断面の楕円、比較のため実験2のNDフィルタなしの等色楕円を破線で表示した。

刺激Orange(LS)、NDフィルタなしでの楕円を破線で表示した。左側の3つのグラフを見ると、確かに破線の楕円に比べて実線の楕円が大きく、時間制限による等色精度の低下が起きていることが分かる。しかし実験2の低輝度条件のときのような楕円方向の変化はなく、特性は変わらない。刺激間隔の影響については、実験1、2と同様に、間隔の増大に伴って楕円が拡大する傾向が見られる。特に6°から60°の間の変化が大きい。しかし楕円方向や形での大きな変化はない。刺激間隔による楕円体の変化は他の参照刺激でも同様である。

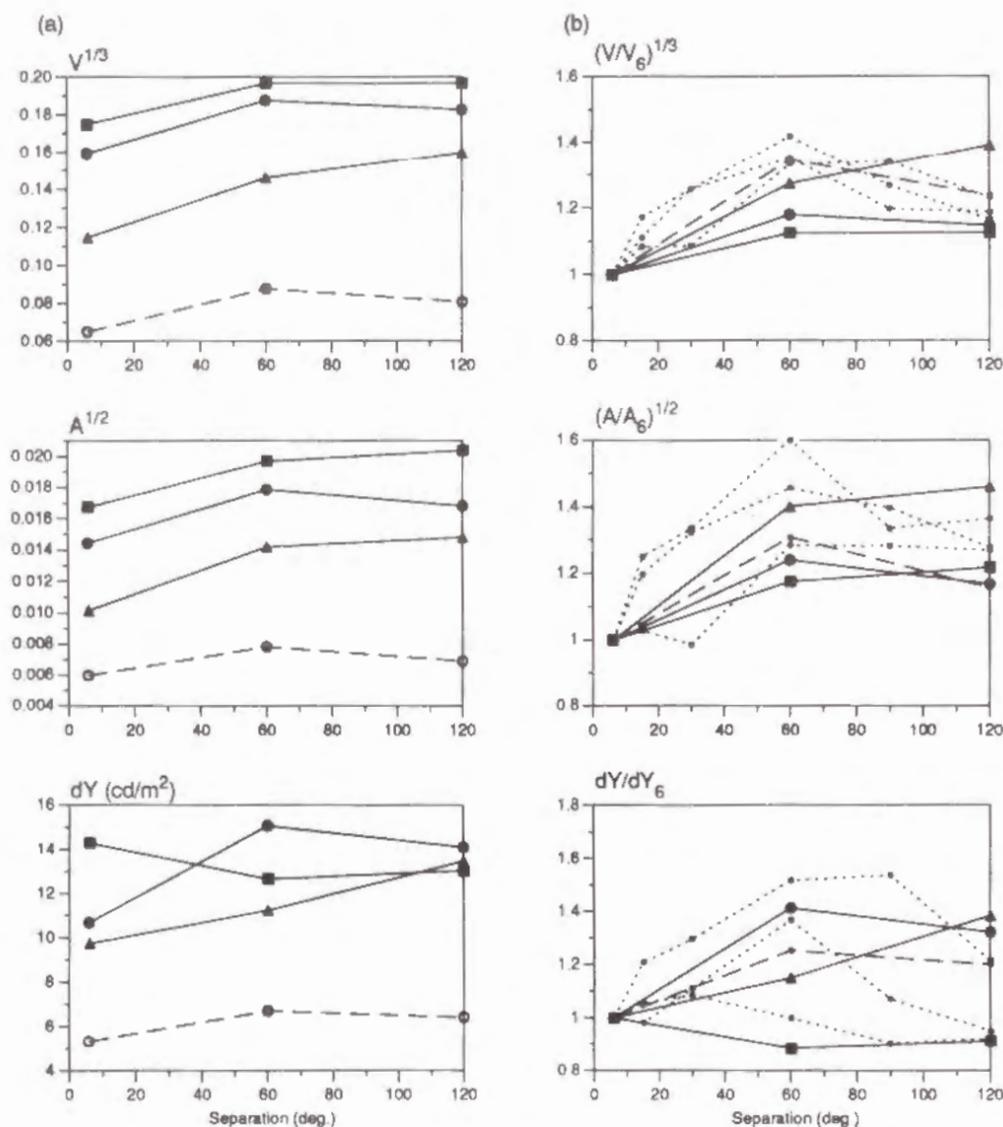


図3-16 刺激間隔に対する等色楕円体の変化。(a) 絶対値 $V^{1/3}$ 、 $A^{1/2}$ 、 $dY$ 。(b) 刺激間隔6°の値に対する相対値 $(V/V_6)^{1/3}$ 、 $(A/A_6)^{1/2}$ 、 $dY/dY_6$ 。■：Orange(LS)、●：Yellow-Green(LS)、▲：Purple(LS)。破線：実験2のOrange(LS)、NDフィルタなし条件での値。点線：実験1の被験者ISの結果(図3-8の上段グラフ)。

次に図3-16(a)に、等色楕円体の体積 $V^{1/3}$ 、楕円面積 $A^{1/2}$ 、輝度方向の径 $dY$ の値を刺激間隔の関数として表示した。■でOrange(LS)、●でYellow Green(LS)、▲でPurple(LS)を表わし、○で実験2のOrange(LS)、NDフィルタなし条件での値を表わした。いずれのグラフにおいても、■が○に比べて高い値を示している。全体で約2.5倍の上昇である。実験2の低輝度条件では色度方向だけで、輝度方向での拡大は見られなかった。しかし、時間制限下では色空間のどの方向にも同等に等色精度の低下が起きている。参照刺激Orange(LS)の $dY$ を除いて、これまでと同様に刺激間隔の増大に伴う値の上昇が見られる。

図3-16(b)には刺激間隔6°に対する相対値を示す。ここでは比較のため実験1の3参照刺激に対する結果を点線で、実験2のNDフィルタなしでの結果を破線で表示した。 $(V/V_6)^{1/3}$ と $(A/A_6)^{1/2}$ においては、刺激間隔60°での値が全般的に低い、定性的にはこれまでと同様の傾向を示している。ちなみに $(V/V_6)^{1/3}$ の平均値は60°で1.19、120°で1.22、また $(A/A_6)^{1/2}$ では60°が1.27、120°が1.28である。 $dY/dY_6$ でのばらつきは依然として大きい、平均をとれば $(V/V_6)^{1/3}$ と $(A/A_6)^{1/2}$ と似たような曲線が得られる。

#### (実験3-2)

全等色点と95%等色楕円体を図3-17に示す。実験3-1で得られた等色楕円体を破線で、実験2の等色楕円体を点線で表示した。全体的に実験3-1に比べると大きな楕円になっている。Orange(LS)とYellow-Green(LS)では6°、Purple(LS)では60°での楕円が最も小さく、刺激間隔に対する変化は参照刺激によって異なっている。また、楕円の方向(長軸の方向)や形(長軸と短軸の関係)も一定していない。この原因は、極端に離れた1、2点の等色点が、楕円体導出の際に大きく影響することにある。特にOrange(LS)の60°と120°、Yellow Green(LS)の60°、Purple(LS)の6°がそれに当てはまる。これまでの実験結果のように特異的に離れた点がないときには、ばらつきの正規分布による近似は妥当であるが、今回のような場合には不適當である。しかし本実験結果は、心理的に切迫した状況では、時間内に等色が達成できないことがときとして起こるということを示している。

図3-18(a)に、等色楕円体の体積 $V^{1/3}$ 、楕円面積 $A^{1/2}$ 、輝度方向の径 $dY$ の値を刺激間隔の関数として表示した。■はOrange(LS)、●はYellow-Green(LS)、▲はPurple(LS)を表わしている。また、実験2のOrange(LS)、NDフィルタなし条件での値を○で表示した。図3-17で指摘した通り、 $A^{1/2}$ においてPurple(LS)、60°での低下が見られる。またYellow-Green(LS)の $dY$ は刺激間隔の増大に伴って減少している。全般的には刺激間隔と共に値が上昇していると言える。しかし実験1、2、3-1と異なり、60°と120°間での上昇が大きい。

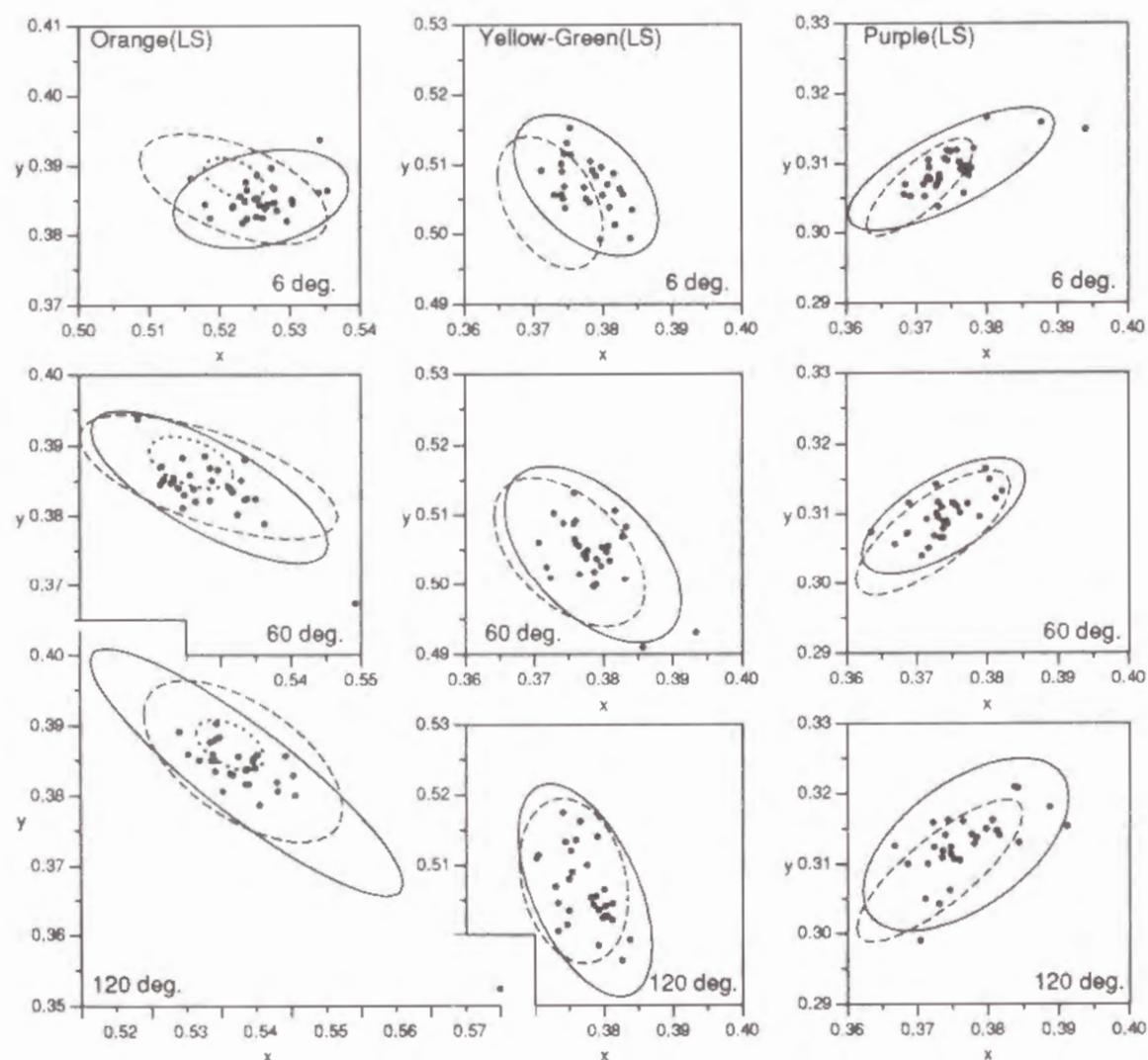


図3-17 全等色点と95%等色楕円体。実線：楕円対中心を通る等輝度断面の楕円、比較のため実験2のNDフィルタなしの等色楕円を点線で、実験3-1の等色楕円を破線で表示した。

続いて図3-18(b)には刺激間隔6°に対する相対値を示す。実験1の3参照刺激に対する結果を点線で、実験2のNDフィルタなしでの結果を破線で表示した。 $(V/V_6)^{1/3}$ 、 $(A/A_6)^{1/2}$ のどちらのグラフでも、値は刺激間隔と共に上昇している。しかし、60°で凸状に折れ曲がるような形状を示しているのはYellow-Green(LS)だけである。刺激間隔120°での平均値は、 $(V/V_6)^{1/3}$ で1.28、 $(A/A_6)^{1/2}$ で1.30となり、これまでと同程度である。60°では $(V/V_6)^{1/3}$ が1.15、 $(A/A_6)^{1/2}$ が1.11とやや低い。

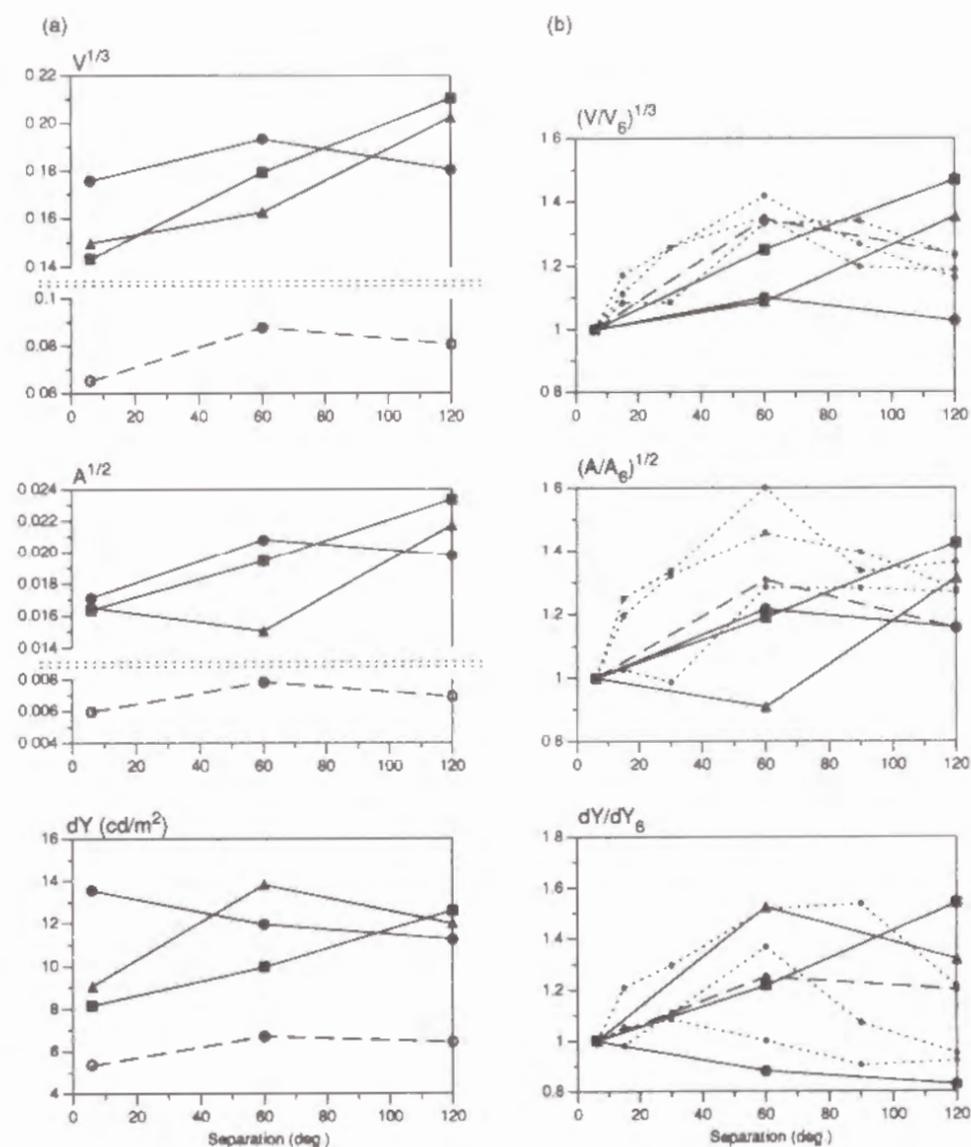


図3-18 刺激間隔に対する等色楕円体の変化。(a) 絶対値 $V^{1/3}$ 、 $A^{1/2}$ 、 $dY$ 。(b) 刺激間隔6°の値に対する相対値 $(V/V_6)^{1/3}$ 、 $(A/A_6)^{1/2}$ 、 $dY/dY_6$ 。■：Orange(LS)、●：Yellow Green(LS)、▲：Purple(LS)。破線：実験2のOrange(LS)、NDフィルタなし条件での値。点線：実験1の被験者HSの結果(図3-8の上段グラフ)。

### 3.3.4 まとめ

時間制限が与えられた状況での、等色精度に対する刺激間隔の影響を検討した。時間制限下では、等色精度は大きく低下していた。しかし、等色精度に与える刺激間隔の影響は、時間制限下でも変わらない。刺激間隔が6°から120°へ広がったときの精度低下は1.2から1.3倍程度である。

## 第4章 等色作業中の視点の動き\*

### 4.1 実験目的

実験1～3で観察された、刺激間隔増大に伴う等色精度低下の主要因は何であろうか、網膜上の特性で説明できるのか、視点移動による時間的なギャップが関係しているのか。視点移動のための諸動作（眼球運動、頭部回転運動）が影響していることも考えられる。Sanders(1970)は視野（刺激の空間分布）の大きさを変えて様々な作業効率を測定しているが、結果は視野の拡大に伴う作業効率の不連続な低下を示していた。そこでSandersは視野を（A）視点移動を必要としない範囲、（B）眼球運動による視点移動だけで足りる範囲、（C）頭部運動による視点移動が必要な範囲、と機能的に分けることでこの現象を解釈している。

実験1においては、等色作業に特に制限時間を設けていない。また注視時間、比較回数等の制約もない。被験者は自由に観察し等色している。したがってその要因を特定するためには、等色作業中の被験者の観察条件を定量的に把握しておく必要がある。例えば比較観察時の視点移動による時間的ギャップが主要因であるかどうかを調べるには、空間条件を一定に保ち、2刺激を継時的に呈示する。そのときの時間的ギャップを、視点移動に要する時間を参考にして設定、変化させ、等色の繰り返し精度を測定すれば良い。そのためには等色作業時の視点移動に要する時間を知っておく必要がある。またSanders(1970)のように、機能的な観点から視野を分類して色弁別能力を解釈しようとするれば、等色作業では刺激間隔がどの程度で頭部の回転が導入されるのかを知っておく必要がある。

本章の目的は、等色作業中の眼球運動および頭部回転運動の測定を基にして視点の動きを解析し、眼球や頭部の回転量、注視時間、視点移動に要する時間、さらに等色が完了するまでの時間や比較回数等を、刺激間隔の関数として導出することにある。そしてそれらの関数と等色精度との相関を調べ、刺激間隔を広げたときの等色精度低下の要因を検討する。

### 4.2 実験

#### 装置

被験者は、図2-5に示されるブースの中央に固定された回転椅子に座って等色作業を行なう。ブース内は無照明、暗黒中に2つの刺激だけが呈示されるため、刺激の見えは光源色モードになる。被験者は右側の等色刺激の色を調節して、左側の参照刺激の色に合わせる。等色刺激呈示用のバーンハム色彩計およ

\*篠田博之、池田光男：等色作業中の視点の動き、照明学会誌、78-10、pp.545-554（1994）に掲載。

び参照刺激呈示装置は共にハロゲンランプの光源とフジフィルム社製の色フィルタにより構成されている。刺激呈示装置の光学系に関しては2.2.1に記述されている。刺激までの視距離は等色刺激、参照刺激ともに約50cm。左側にある参照刺激呈示装置は被験者頭上のアームに固定されており、被験者を中心とする円周上を移動することで刺激対の間隔を変えている。シャッターを開閉するボタンと色彩計をコントロールする3つのノブは色彩計の下方部に取り付けられている。

眼球運動、頭部の回転運動の測定には竹井機器製の視点位置測定装置「トークアイ」を使用した。この視点位置測定装置の検出部は、ゴーグルの中央上部のCCDカメラ、右眼の下方部に取り付けられた眼球位置測定センサー（リンバストラッカー）により構成されている。CCDカメラは水平510×垂直490の約25万画素の解像度を有している。CCDカメラの映像は被験者正面の情景を映し出しており、画面上の対象物の位置から頭部正面の向いている方向を知ることができる。またリンバストラッカーは強膜（白目部分）と角膜（黒目部分）の反射率の違いを利用した、強膜反射法と呼ばれる方法で眼球位置を計測している。実際には赤外LED光の、右眼の角膜輪部による反射光を、水平に並んだ2つのフォトダイオードで受光し、2つの出力の差から水平方向の眼球位置を、出力の和から垂直方向の位置を検出する（図4-1）。この検出器のサンプリング間隔は1フレーム、33msecである。眼球位置の測定範囲は頭部正面に対し±20°である。頭部に対する相対的な眼球位置を示す座標値およびフレームカウント（時間）は、画面の右上隅にCCDカメラの映像に重ねて表示される。その映像をビデオテープに録画し、後にビデオテープを再生して解析する。頭部位置測定のための基準対象物として5個の赤色LEDを、色刺激対と同一水平面上に被験者から95cmの円周上で20°間隔に配置し、等色作業に障害とならない程度の明るさで点灯した。対象物の位置はモニタに固定された製図用の平行定規で測定した。

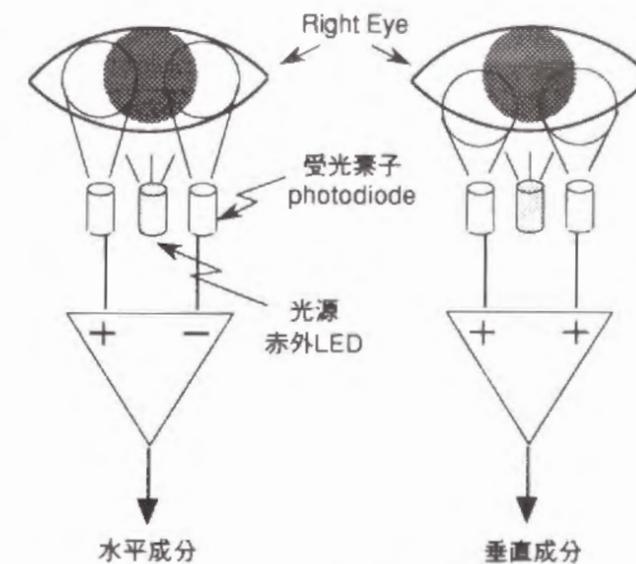


図4-1 リンバストラッカーの眼球位置検出原理。

## 条件および被験者

参照刺激、等色刺激は共に $2^\circ$ の正方形。刺激対の間隔(2刺激の中心間の距離)は $6^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ の6間隔。参照刺激は実験1で使用した参照刺激のうちの一つYellow-Greenで、ミノルタ社CS-100による測光値は、輝度 $209.5\text{cd/m}^2$ 、CIE1931xy色度座標(0.393, 0.544)であった。被験者は実験1に参加していたHS(27才、男性)、TI(31才、男性)の2名である。

## 手順

被験者は着席し、メガネを装着。視点位置測定装置の較正をした後、実験者が刺激間隔を設定して実験開始となる。被験者はボタンを押してシャッターを開き、等色作業を始める。制限時間はなく、必要に応じて眼球運動や頭部回転により視点を移動しながら、自由に観察して等色する。等色したらボタンを押して終了する。実験者が等色値を記録した後、被験者は等色を崩し、再びボタンを押して等色を開始する。この作業を5回繰り返す。終了したら眼球運動が正しく測定されているか確認し、必要ならば視点位置測定装置の再較正をする。次に実験者は刺激間隔を変えて同様に5回の等色を行ない、1セッションの測定を終了する。刺激間隔が6条件あるので計3セッションとなる。

## 4.3 結果と考察

### 4.3.1 等色値のばらつき

本実験の主目的は視点の動きの測定であり、このことは被験者も知っている。したがって実験に対する姿勢が実験1とは異なる、つまり等色作業に対する集中度が異なる可能性がある。またメガネを装着することにより、被験者の動作に制約を与えているのではないかと懸念される。もしそうだとすれば、等色精度が低下し、ばらつきが大きくなると予想される。これを検証するために、今回のばらつきを実験1で求めた95%楕円体と比較した。今回と前回の等色中心位置はずれているため直接比較できない。そこで中心位置を揃えて比較することにした。図4-2には本実験5回の等色点と、実験1の95%楕円体を共に平均値を原点として表示した。本実験と実験1の等色中心位置のずれは平均で、被験者HSではxが $-0.003$ 、yが $+0.004$ 、輝度Yが $+13.6\text{cd/m}^2$ 、被験者TIでは $-0.007$ 、 $+0.008$ 、 $+11.8\text{cd/m}^2$ であった。十分に比較が可能な、つまり線形性が保たれる範囲のずれである。各点は5回の等色点のxy平面への射影で、特に大きなシンボルで示される等色に関しては作業中の眼球運動、頭部運動について詳細な解析を行なった。これについては4.3.3で説明することとする。実線の楕円は実験1の95%楕円体の、中心を通る等輝度面での断面を表している。いずれのグ

ラフにおいても、今回の等色点は楕円の範囲にほぼ収まっている。また、ばらつきの傾向も被験者TIの $90^\circ$ 以外は前回の楕円の向きと一致している。つまり本実験の目的を被験者が知っていることやメガネの装着による等色精度の低下は起きていない。したがって、前回と同等の作業状況が実現されていると考えてよい。

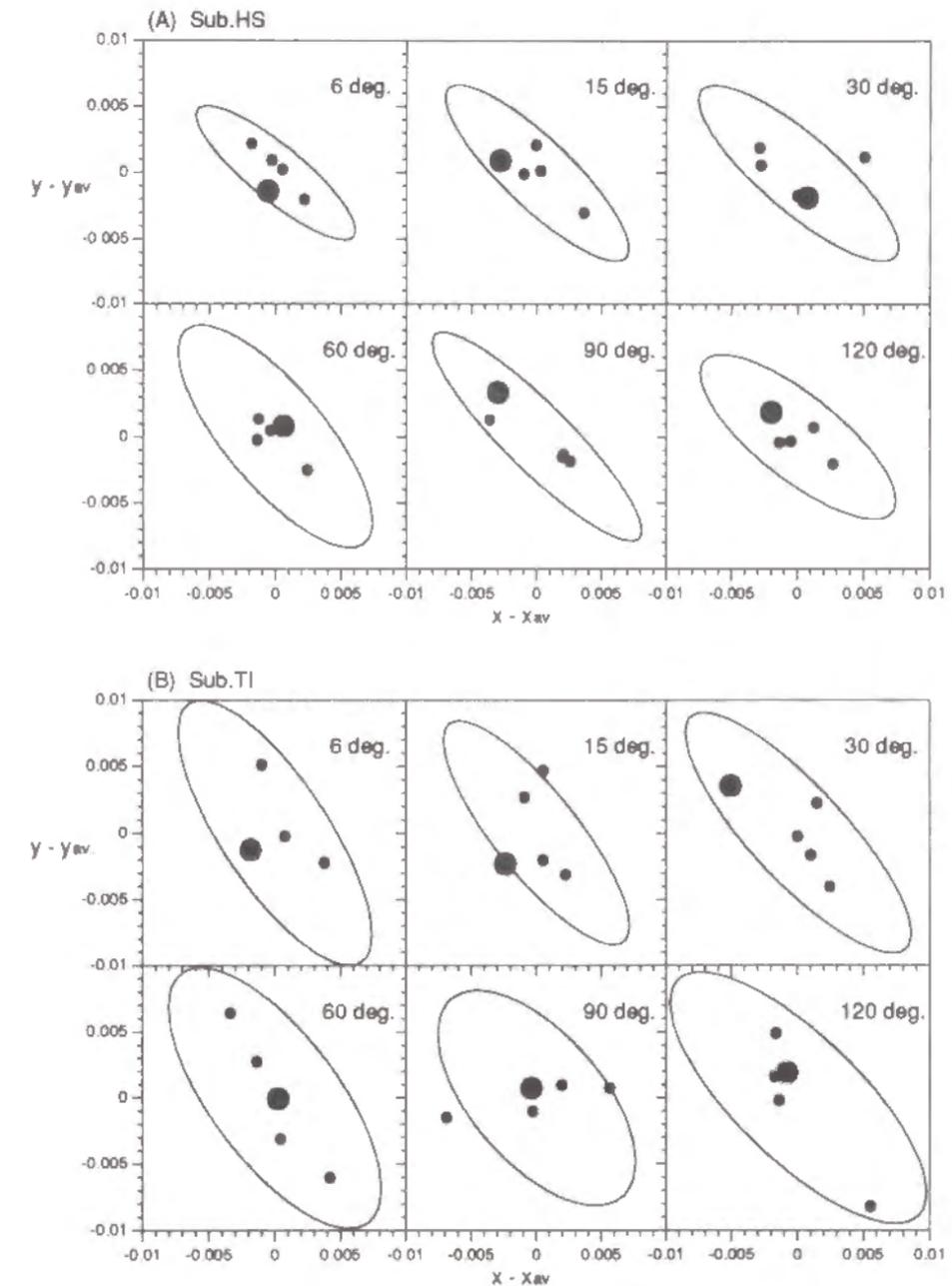


図4-2 本研究で得られた等色点と実験1の等色楕円体。

黒点：5回の等色点のxy色度平面への投影。ただし視点の動きを解析した回の等色点を大きな点で表わした。実線：等色楕円体の中心を通る等輝度断面の楕円。5回の等色点および楕円体の中心を原点(0,0)にとった。(A)は被験者HS、(B)は被験者TI。

#### 4.3.2 等色にかかる時間と観察回数

等色中の視点位置測定装置の映像は全て録画されている。映像には頭部正面方向の景色に重ねて視点の軌跡が描かれている。また、眼球の頭部に対する相対位置座標（角度）や測定開始からのフレームカウント（1フレームは33msec）も画面右上に表示されている。

再生映像を全般的に観察して言えることは、作業前半では参照刺激を観察する時間は少なく、ノブをまわすことに専念し、大まかに調色していることである。それに対し後半は、ノブをまわすことは少なくなり比較的じっくりと観察している。これは微調整そして最終決定の判定をしていることを示している。前後半を通して等色刺激よりも参照刺激を注視している時間の方が短い。

まず始めに等色に要した時間と等色中の視点移動回数を計測した。時間はシャッターが開いてから閉じるまでのフレーム数に33msecを掛けた値とし、その間の視点移動の回数は映像中の軌跡から直接数えた。図4-3に両被験者の1回の等色に要した時間（ $T_m$ ）、1回の等色作業中の視点移動回数（ $N_s$ ）、および $T_m$ を $N_s$ の2分の1で割った値、つまり1回の比較にかけた時間（ $T_c$ ）を刺激間隔の関数として表示した。

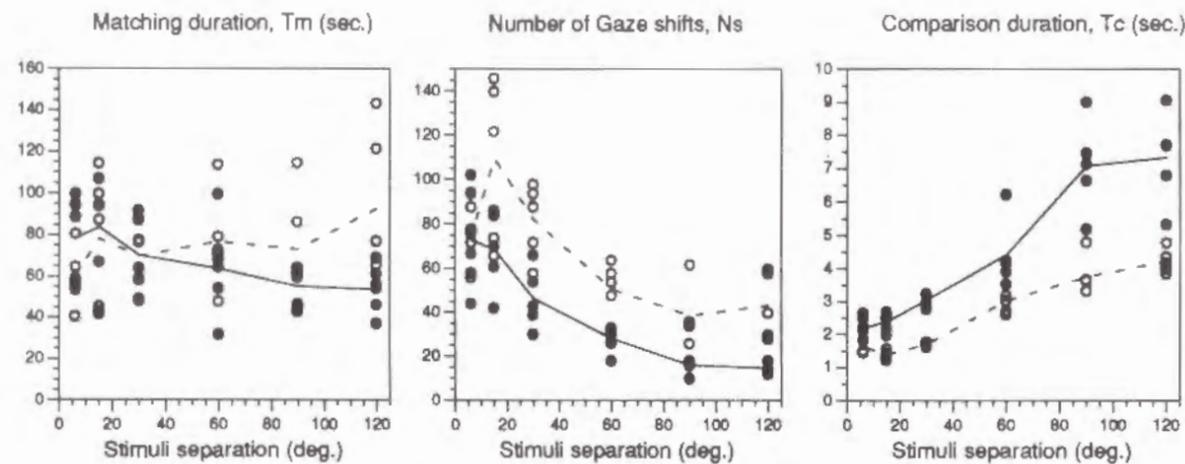


図4-3 等色に要する時間（ $T_m$ ）、視点移動回数（ $N_s$ ）、1回の比較にかけた時間（ $T_c$ ）。左から $T_m$ 、 $N_s$ 、 $T_c$ のグラフ。○：被験者HS、●：被験者TI。平均値を折れ線で示した。破線：被験者HS、実線：被験者TI。

この図から次の3点が示される。

グラフ（A）から

(1) 被験者HSでは刺激間隔が広がるにつれてわずかに等色に要する時間（ $T_m$ ）も増大している。逆に被験者TIではわずかに減少している。しかしどちらにしても変化は比較的小さく、ほぼ一定と言える。

グラフ（B）から

(2) 視点移動回数（ $N_s$ ）は両被験者共、間隔の増大に伴って減少している。

グラフ（C）から

(3) 両被験者とも刺激間隔が広がるにつれて、1回の観察にかかる時間（ $T_c$ ）は増大している。120°では6°の約3倍の値になっている。

低輝度刺激での弁別能力の低下（Brown 1951）等に比べると、実験1では「刺激間隔が広がると等色作業は非常に難しくなる。」という被験者の内観報告にも拘らず、等色の繰り返し精度にはあまり反映されていなかった（楕円体体積 $V^{1/3}$ で約1.3倍の増大、表3-3参照）。この理由として、間隔が広がって難しくなった分、観察回数を増やし時間をかけて等色することで補っているのではないかと予想していた。しかし実際は等色にかかる時間（ $T_m$ ）はほぼ一定、また間隔が広い方が比較回数（ $N_s$ ）は少なかった。（A）、（B）において、等色開始時の色彩計の設定が統一されていないので絶対値自体は特別な意味を持たない。特に等色を崩すのは被験者に任されており、（A）、（B）で見られる被験者間の差もその影響があるだろう。しかし刺激間隔に対する相対的な変化は被験者間で一致しており、一般的な傾向を示している。 $T_c$ のグラフは総時間（ $T_m$ ）を視点移動回数（ $N_s$ ）の2分の1で割ることで1回の比較観察にかかるおよその時間を知ろうとしたものである。勿論これには2回分の視点移動に要する時間も含まれているし、上で述べた作業前半と後半、あるいは参照刺激と等色刺激等の違いが考慮されていない。しかしグラフからは、刺激間隔に応じて、無意識のうちになされる戦略（strategy）切り替えの様子を読み取ることができる。本論文ではこの“戦略”という語を、課せられた作業を遂行するための視覚系の対応（処理）方法という意味で用いる。すなわち近いときには注視時間を短くし、頻繁に比較しているが、離れているときは1回の注視に充分時間をかけて比較している。また視点移動の頻度も少ない。この測定とは別に、被験者HSは刺激間隔60°以上の条件において、短い注視時間で頻繁に視点移動しながら等色を試みたが、思うように色比較ができず、ストレスの伴う作業となった。したがって、もし刺激間隔が広がっても同じ観察方法を探っていたならば、弁別能力の低下が大きくなっていただかぬかも知れない。しかし実際は、視覚系が戦略を変更して対応するため、作業自体は難しく感じても、それほど精度低下にはならない。また参照刺激の呈示時間を1sec.に固定し、なおかつ一回々々の比較観察を区切り、頻繁に見比べられない状況で等色させた実験\*では、等色精度に刺激間隔6°と120°の差は現れなかった。この場合は逆に、刺激間隔6°の条件に適した観察方法を遂行できなかったために精度が上がらなかったと考えられる。作業の難易度によって注視時間が変化するという報告（Rayner and McConkie 1976）はあるが、視点移動量の大きさによって変化する

\*篠田博之、池田光男：空間的に離れた刺激の等色、第24回日本色彩学会全国大会（1993）にて発表。

るという報告は今のところない。視点移動量が大きいほど記憶における色情報の劣化が激しいとするなら、大きな視点移動時の注視中にはより多くの情報抽出、あるいは記憶への固定強化をしなければならず、注視時間が増大するのであろう。

### 4.3.3 視点の動きの解析

#### 解析方法

4.3.2で述べたように、前半では参照刺激を見ることは少なく、もっぱら大まかに調色している。この段階では2刺激間の色差は大きく、明らかに弁別閾上である。しかし後半になると2刺激を比較観察することが増え、調色は微調節になる。この段階では被験者は弁別閾付近の色差を観察していることが予想される。したがって、等色精度（色弁別能力）に関与しているのは後半の観察であると考えられる。そこで等色終了前の16.5秒間（500フレーム）の観察動作に対して眼球運動、頭部運動の解析を行なった。解析したのは5回の等色の内の1回で、図4-2の大シンボルで示されている。ビデオテープをコマ送り再生し、モニタに固定された平行定規を用いて（1）刺激またはLEDの画面上での水平位置を測定、さらに画面右上の数値から（2）頭部に対する眼球位置E、（3）フレーム数（時間）Tを記録する。視点移動中および前後は1フレーム（33msec）毎に、注視時は必要に応じて1～10フレームの間隔で計測した。（1）の測定値から頭部正面の向いている方向Hを計算し、頭部に対する眼球方向Eを足して視線方向（ $G = H + E$ ）を算出する。HとGは等色刺激の位置を原点とし、参照刺激の方向、つまり被験者から見て左側を正方向にとった座標系とした。Eは同じく左側を正方向とした頭部正面からの相対座標系である。またそれぞれの速度 $V_E$ 、 $V_H$ 、 $V_G$ も計算している。例えば眼球回転速度 $V_E$ は次のように計算される。時刻 $T_1$ での眼球位置を $E(T_1)$ 、次の計測時刻 $T_2$ での眼球位置を $E(T_2)$ とすると、時刻 $(T_1+T_2)/2$ での速度は次式で定義される。

$$V_E \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right) = \frac{E(T_2) - E(T_1)}{T_2 - T_1}$$

#### 眼球運動と頭部回転運動の協調動作

図4-4、4-5、4-6に両被験者の眼球位置E、頭部位置H、視点位置Gの計測結果を表示する。ここでは刺激間隔が15°、30°、90°の結果のみを表示する\*。いずれも上段に眼球位置E、下段に頭部位置H（太い実線）、視点位置G（細い実線）を示した。

\*刺激間隔 6°、60°、120°の結果は巻末の付録4に記載した。

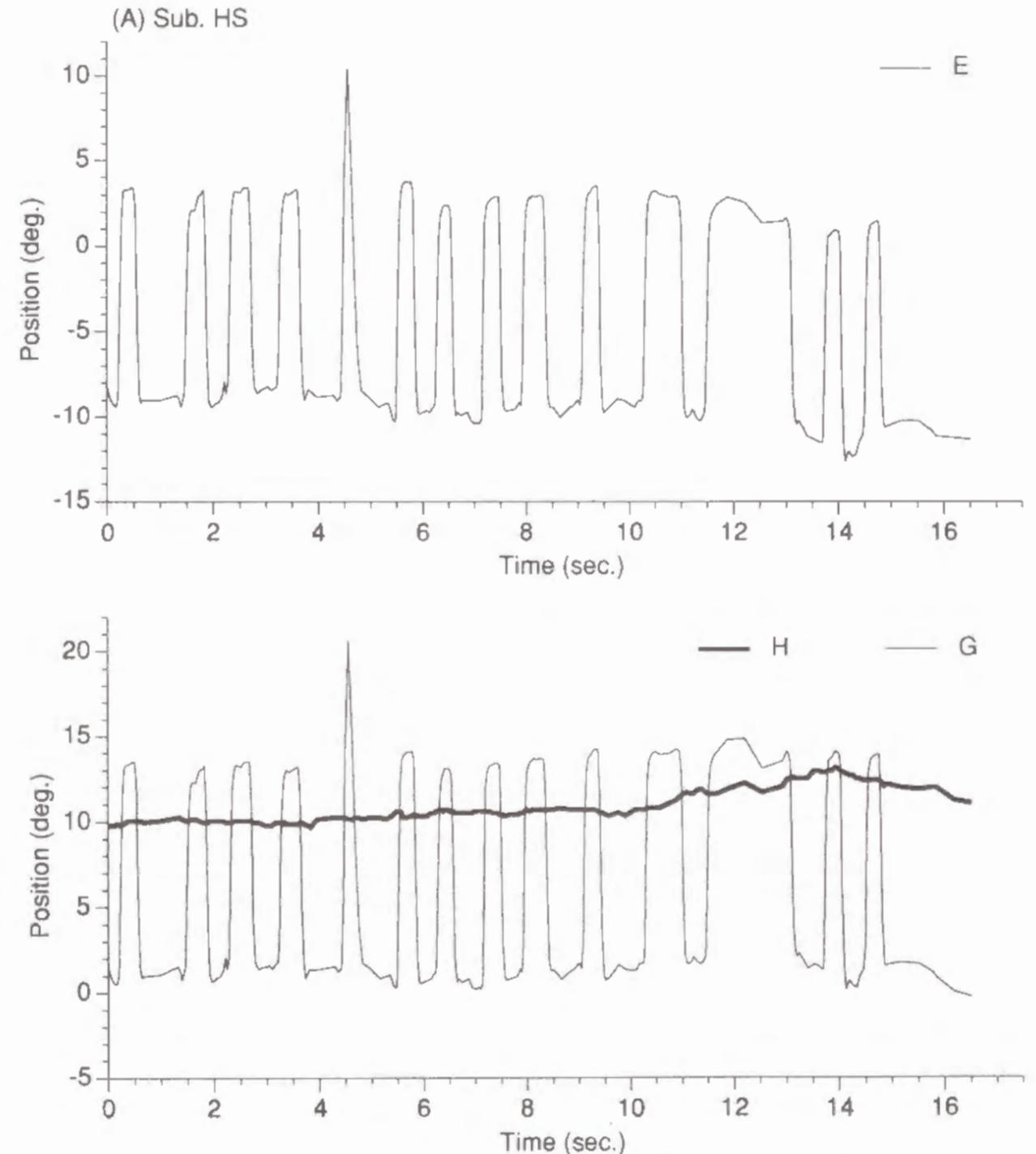


図4-4(A) 等色作業中の眼球、頭部、視線の動き。被験者HS、刺激間隔は15°。図4-2中の大きな黒点で示される回の終了前16.5秒間の位置を解析した。上段グラフ：頭部方向に対する眼球の方向E、下段グラフ：等色刺激に対する頭部H（太い実線）と視点G（細い実線）の方向。いずれも等色刺激の方向を0とし、左を正方向にとった角度で示す。

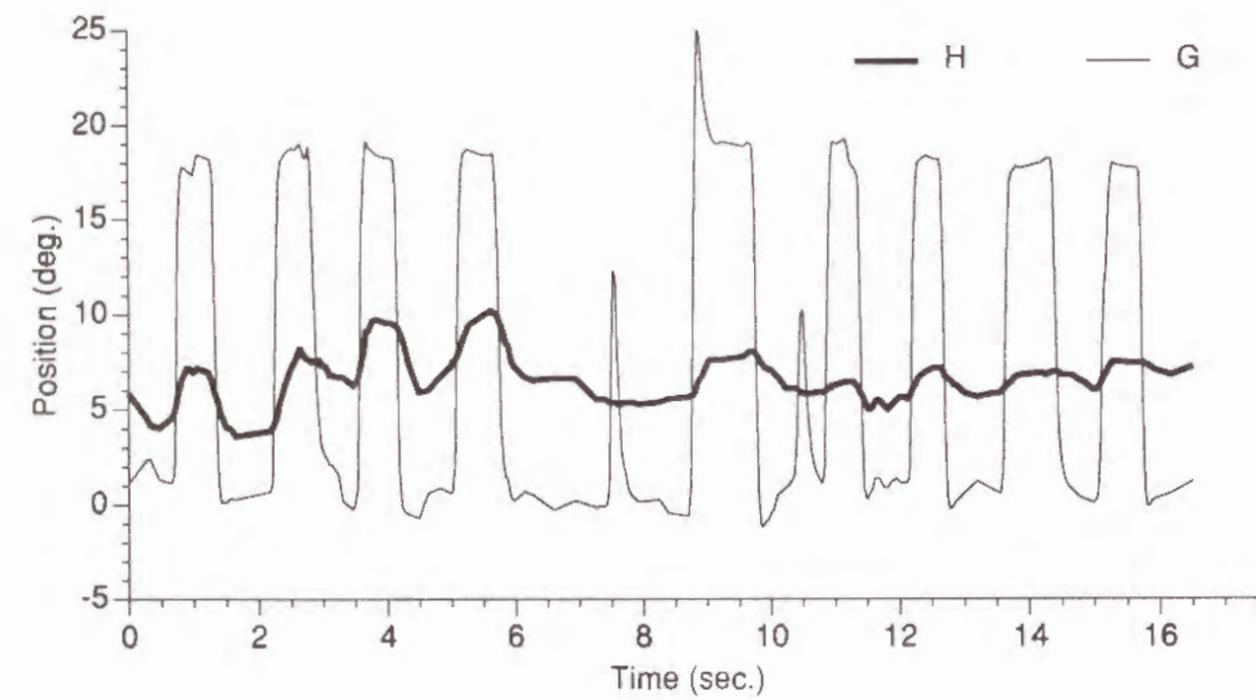
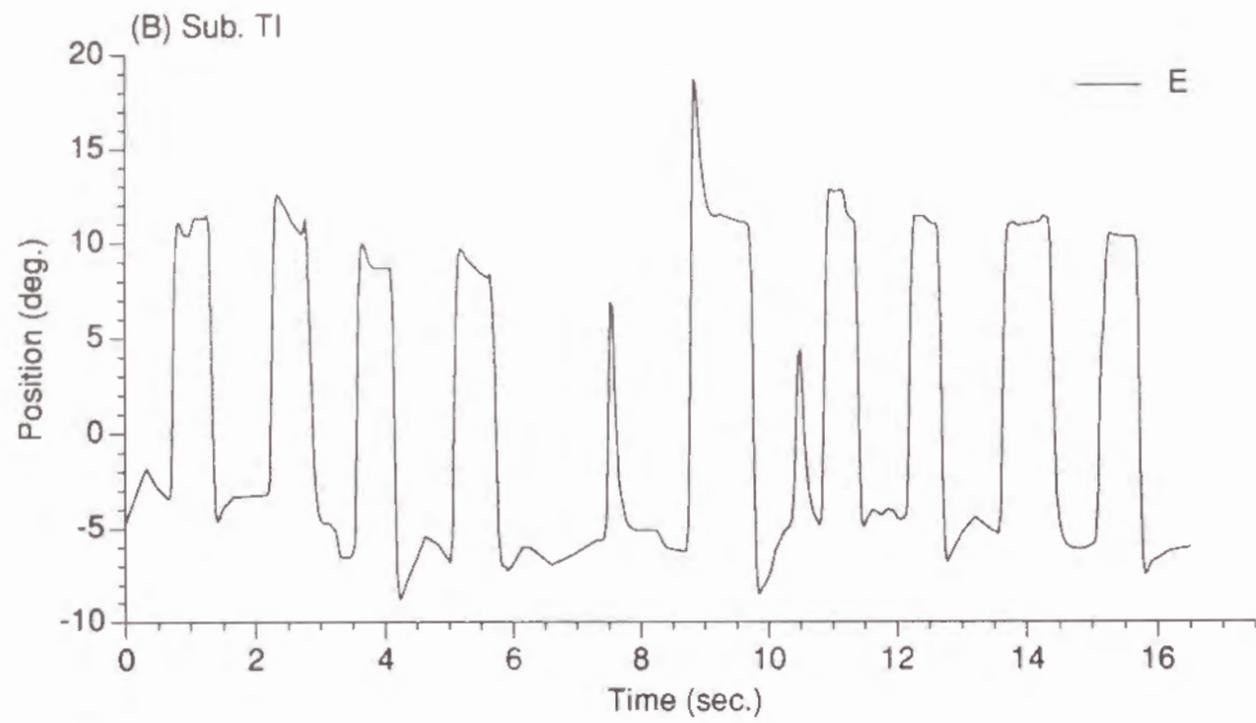


図4-4(B) 等色作業中の眼球E、頭部H、視線の動きG。被験者TI、刺激間隔は15°。

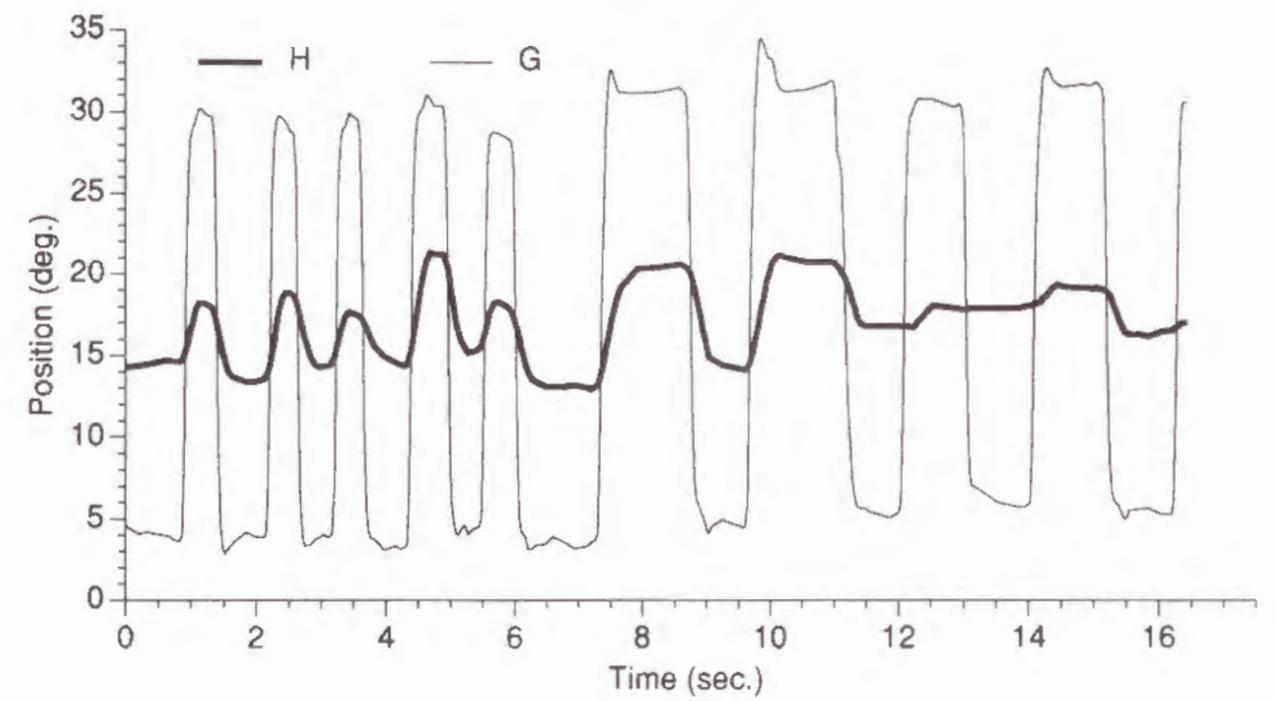
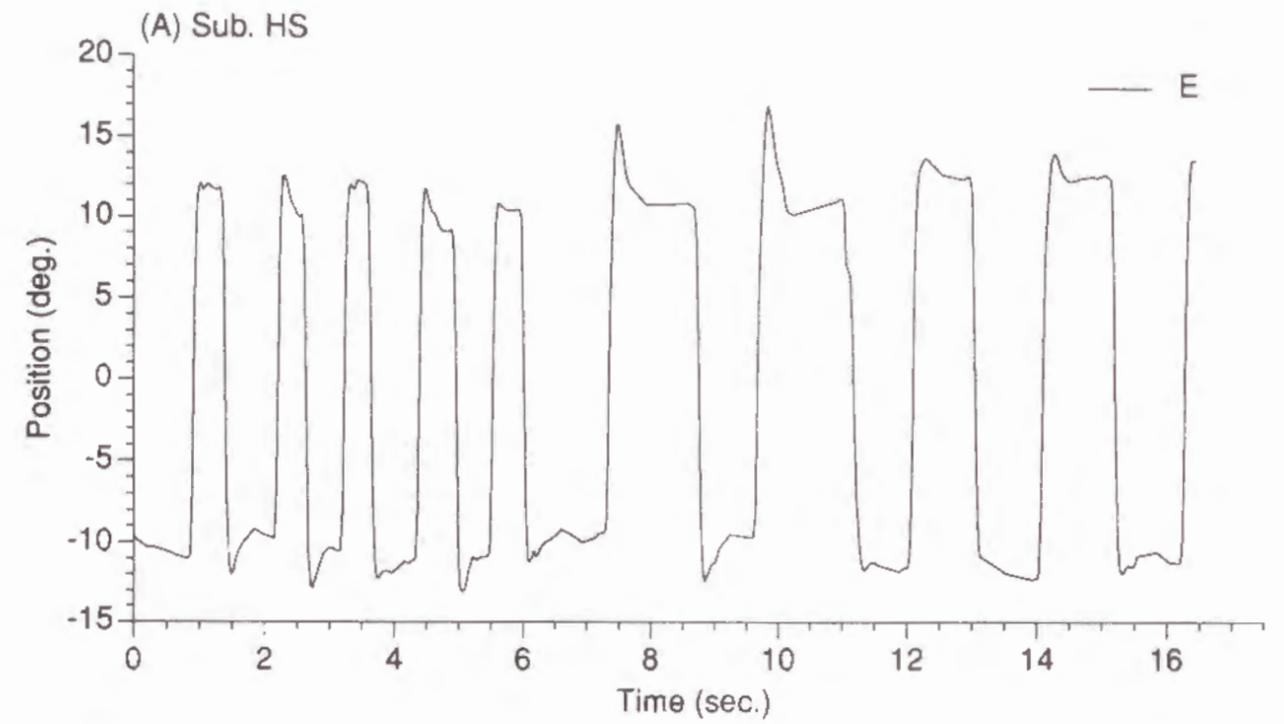


図4-5(A) 等色作業中の眼球E、頭部H、視線の動きG。被験者HS、刺激間隔は30°。

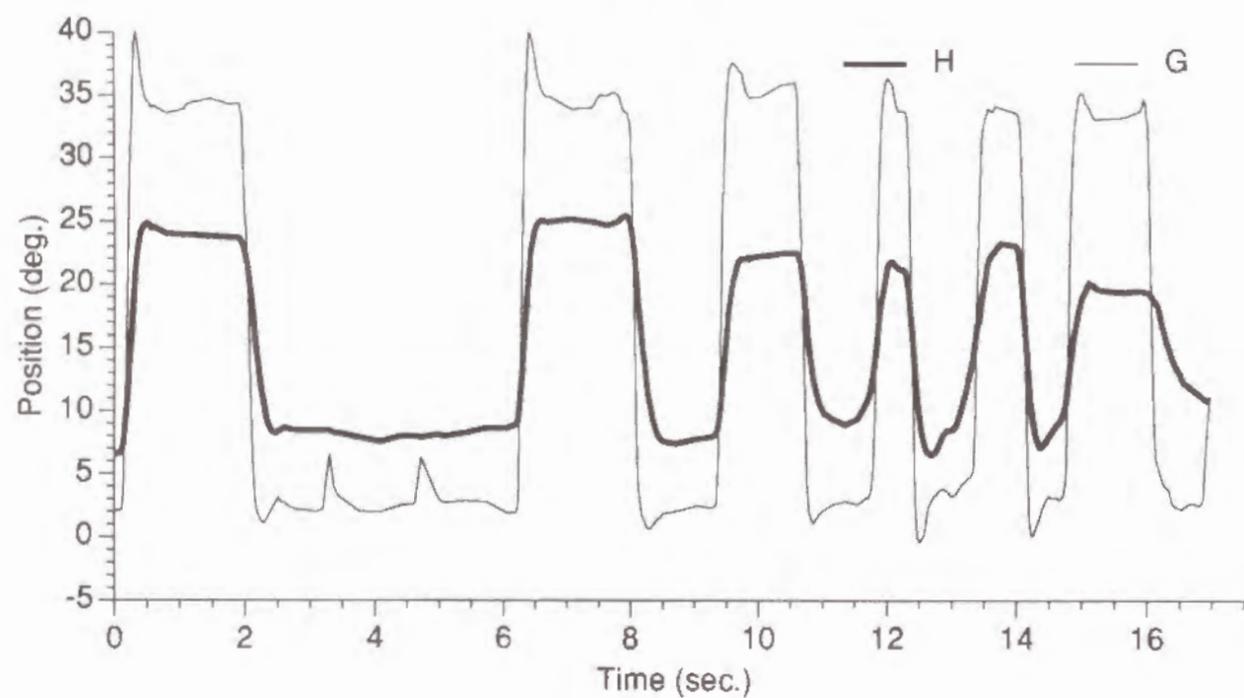
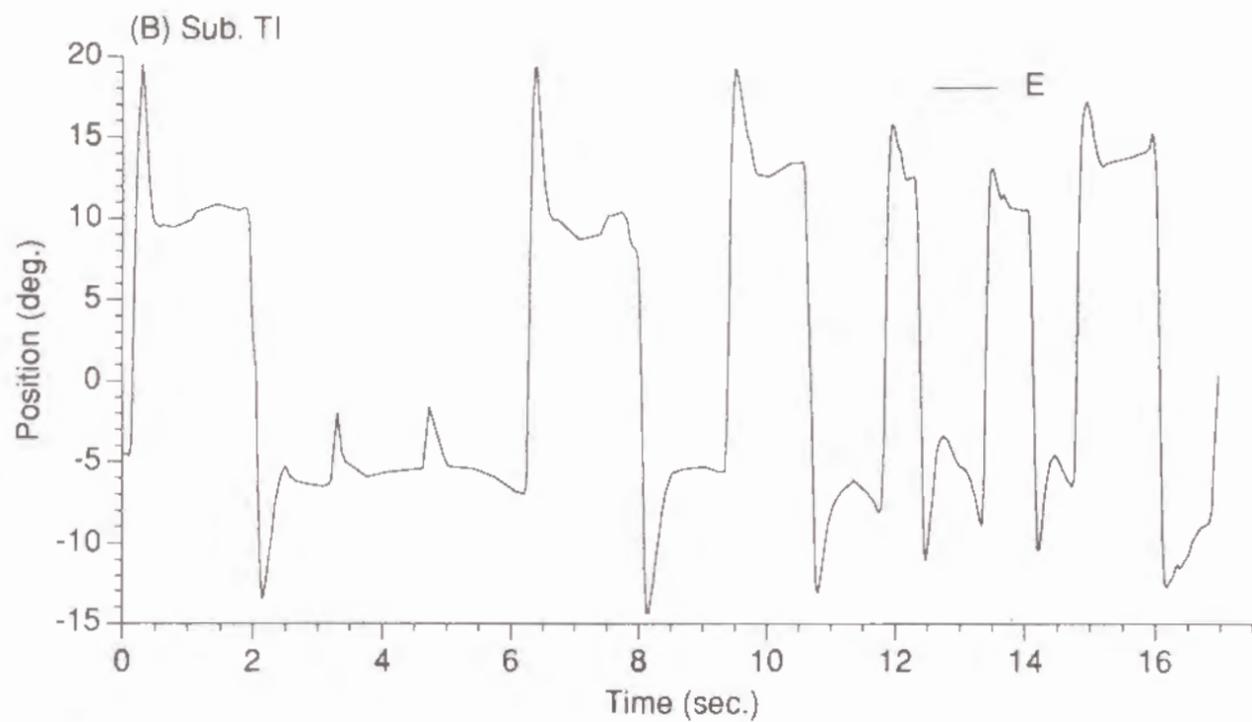


図4-5(B) 等色作業中の眼球E、頭部H、視線の動きG。被験者TI、刺激間隔は $30^\circ$ 。

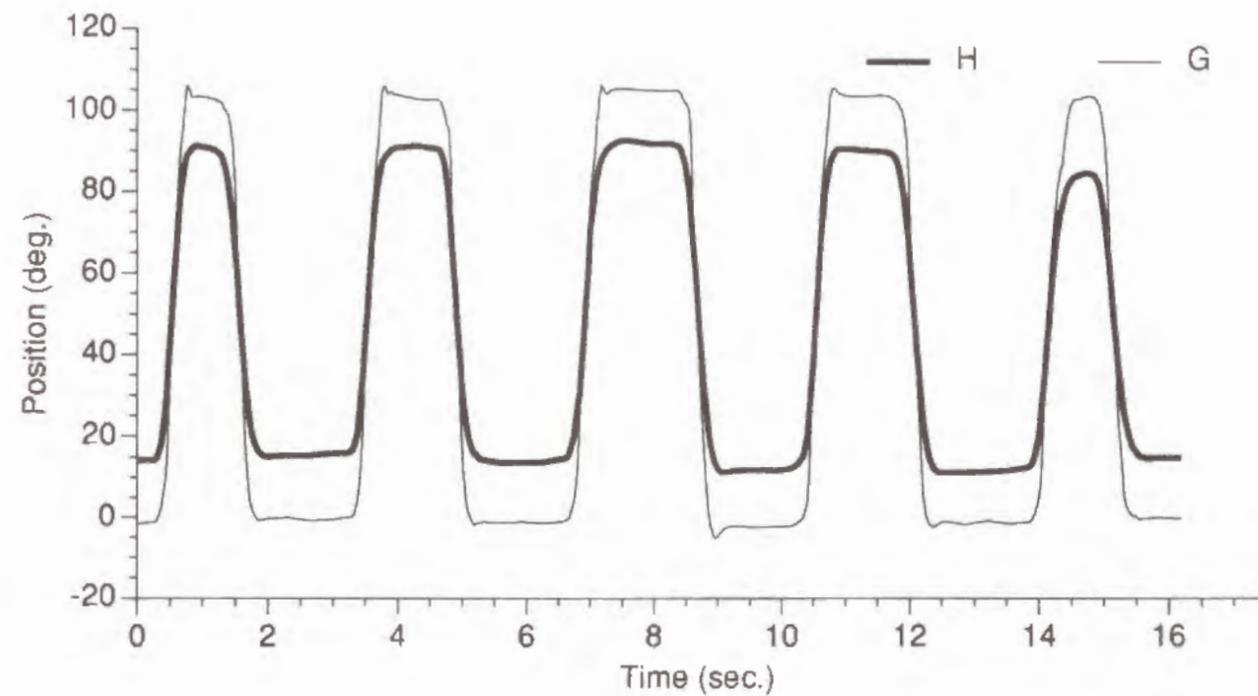
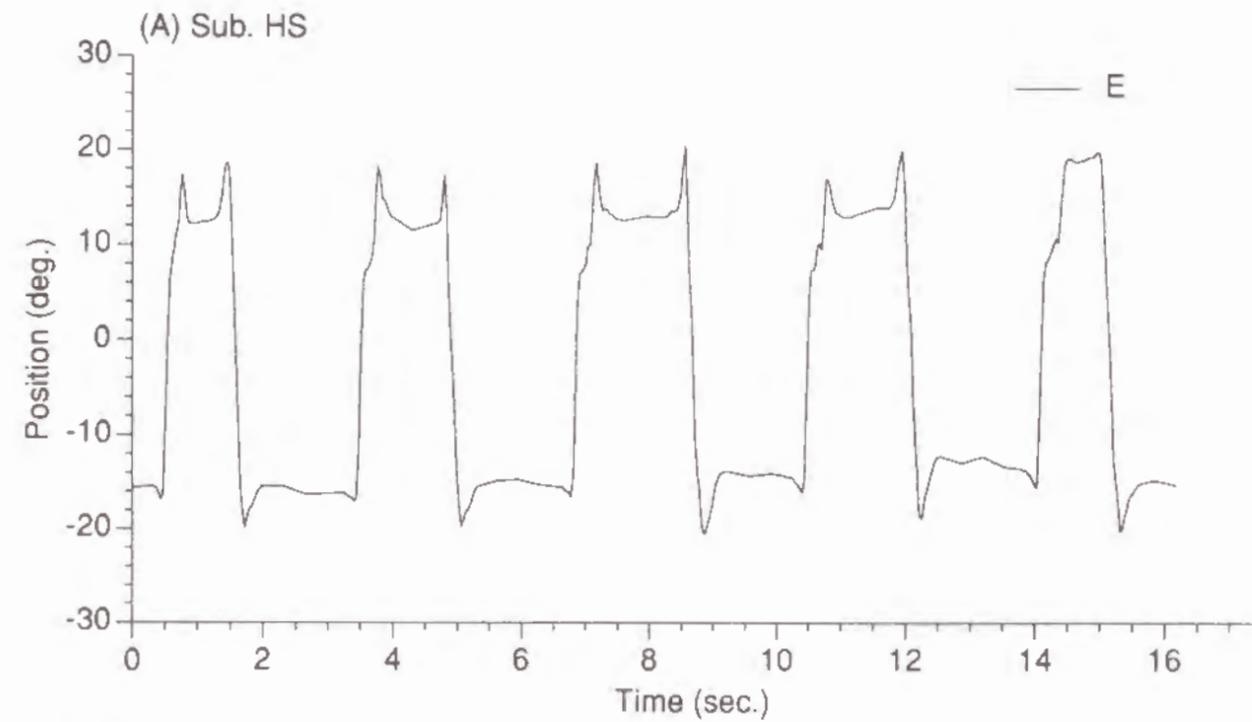


図4-6(A) 等色作業中の眼球E、頭部H、視線の動きG。被験者HS、刺激間隔は $90^\circ$ 。

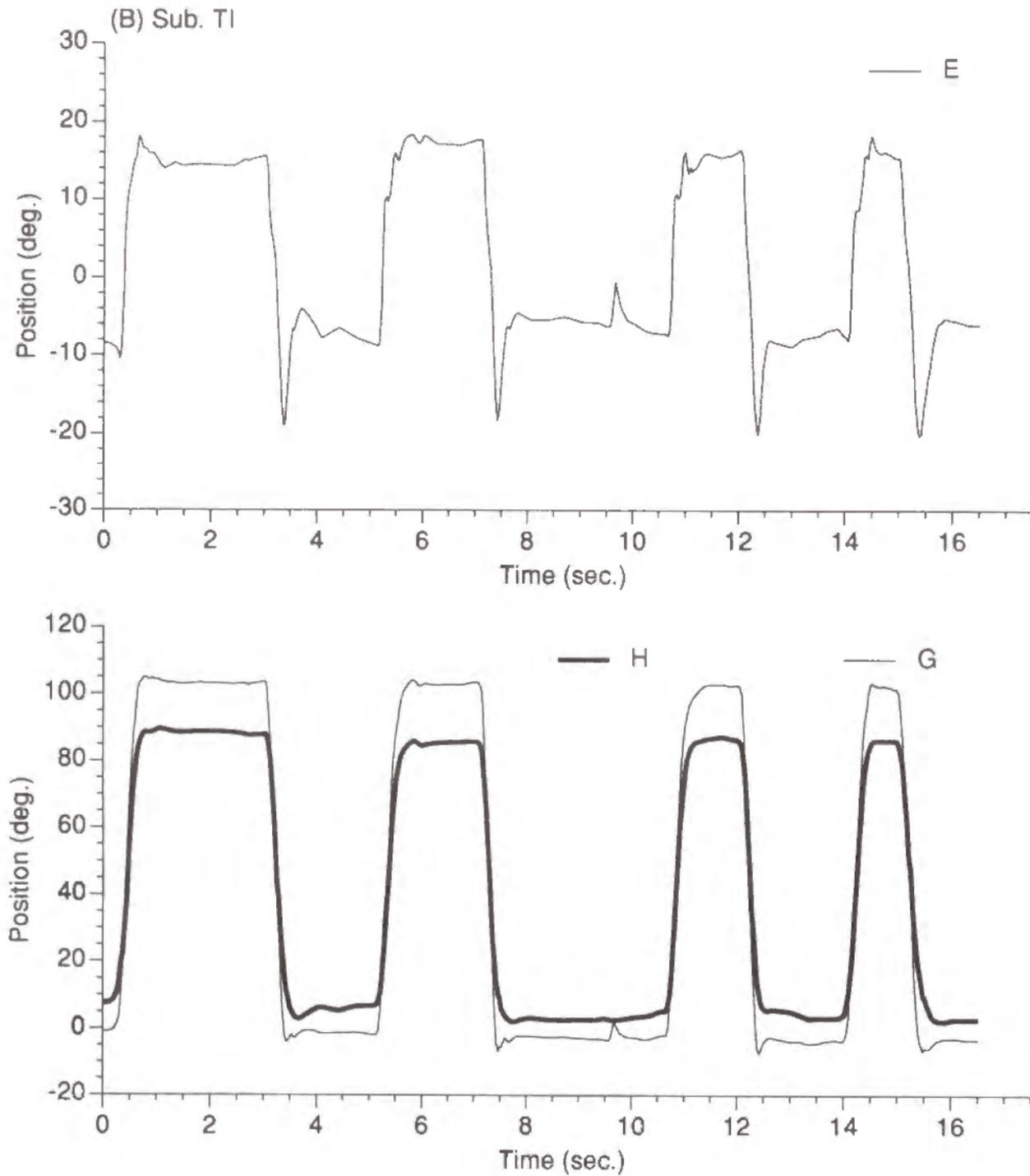


図4-6(B) 等色作業中の眼球E、頭部H、視線の動きG。被験者TI、刺激間隔は90°。

図4-4の(A)、被験者HSの15°では眼球だけで視点を移動しており、頭部は10°付近に停止している。眼球位置Eは注視と跳躍眼球運動(サッケード)の繰り返しからなる典型的な軌跡を描いている。視点位置Gは0°と13°付近の往復で、この振幅は刺激間隔の設定15°よりも小さい。この原因は測定装置の誤差に加えて、頭部位置の変化による影響が大きいと思われる。特に前後の移動や顎の引き加減による視距離の変化が大きく影響している。この場合について計算すると頭部が約7cm下がっていたことになり、その可能性は十分にあり得る。5秒付近にスパイク状の動きが見られるがこれは瞬きを捕らえたもので視点移動ではない。等色刺激に比べて参照刺激を観察している時間は短い(0.5秒間程度)。一方被験者TIは6秒以前の視点移動において頭部を回転している(回転量約3°)。また視点移動Gの振幅は約18°と大きく、50cmより近づいて観察していたと予想される。また3回のスパイクは瞬きである。被験者HSに比べて視点移動回数は少なく注視時間は長い(参照刺激で約0.7秒間)。

図4-5の刺激間隔30°になると被験者HSでも頭部の回転が始まる(回転量は約5°)。ここでサッケード直後の反対方向への特徴的な眼球運動に注目しなければならない。これは頭部回転と同一速度、逆方向に眼球を回転させることにより視点を停止させておくもので、前庭眼球反射(vestibulo-ocular reflex、VOR)と呼ばれる。VORは頭部回転の起きる大きな視点移動時に一般的に見られる眼球運動である。また7.5秒、10秒、14秒付近で見られるVORは視点移動のエラーの修正にもなっており、Gのグラフを見ると、行き過ぎた視点が戻る様子が伺える。本実験で被験者に課せられた作業は色合わせであり正確に視点移動することではないためか、このような視点移動のエラーはかなり多く見られた。前半は視点移動が頻繁(注視時間は約0.5秒間)で後半はじっくり(注視約1秒間)と観察している。被験者TIは被験者HSに比較して頭部の回転量が約15°と大きく、逆に視点移動回数は少ない。VORや視点移動エラーの修正運動が同様に観察されている。3秒、5秒付近のスパイクは瞬きである。

図4-6の刺激間隔90°ではサッケード直前のVORも観察されている。頭部回転開始と同時に逆方向へ眼球が回転することにより頭部が動き出しても視点はもとの位置に残る。特に被験者HSの参照刺激から等色刺激への視点移動時に顕著である。また視点移動中に、眼球の回転速度が一時的に落ちる箇所があるが、これは大きな視点移動では多段階のサッケードが起こることを示している。サッケード直後のVORは30°と同様に観察されている。一方被験者TIでは被験者HSに比べて直前のVORは小さく頻度も少ないが、多段階のサッケードは観察されている。また直後のVORは等色刺激側で大きく、眼球が0°(頭部正面)ではなく7°付近を中心に振幅していることを示している。両被験者とも刺激間隔が広がるにつれて視点移動回数が減少し、1回の注視時間が大きくなっている。ここでも3.2で述べた視覚系の戦略(strategy)の切り替えが現れている。

次に刺激間隔90°の場合\*の眼球の回転速度( $V_e$ )、頭部の回転速度

\*刺激間隔90°以外の結果は巻末の付録5に記載した。

( $V_H$ )、視点の移動速度 ( $V_G$ ) を図4-7に示す。

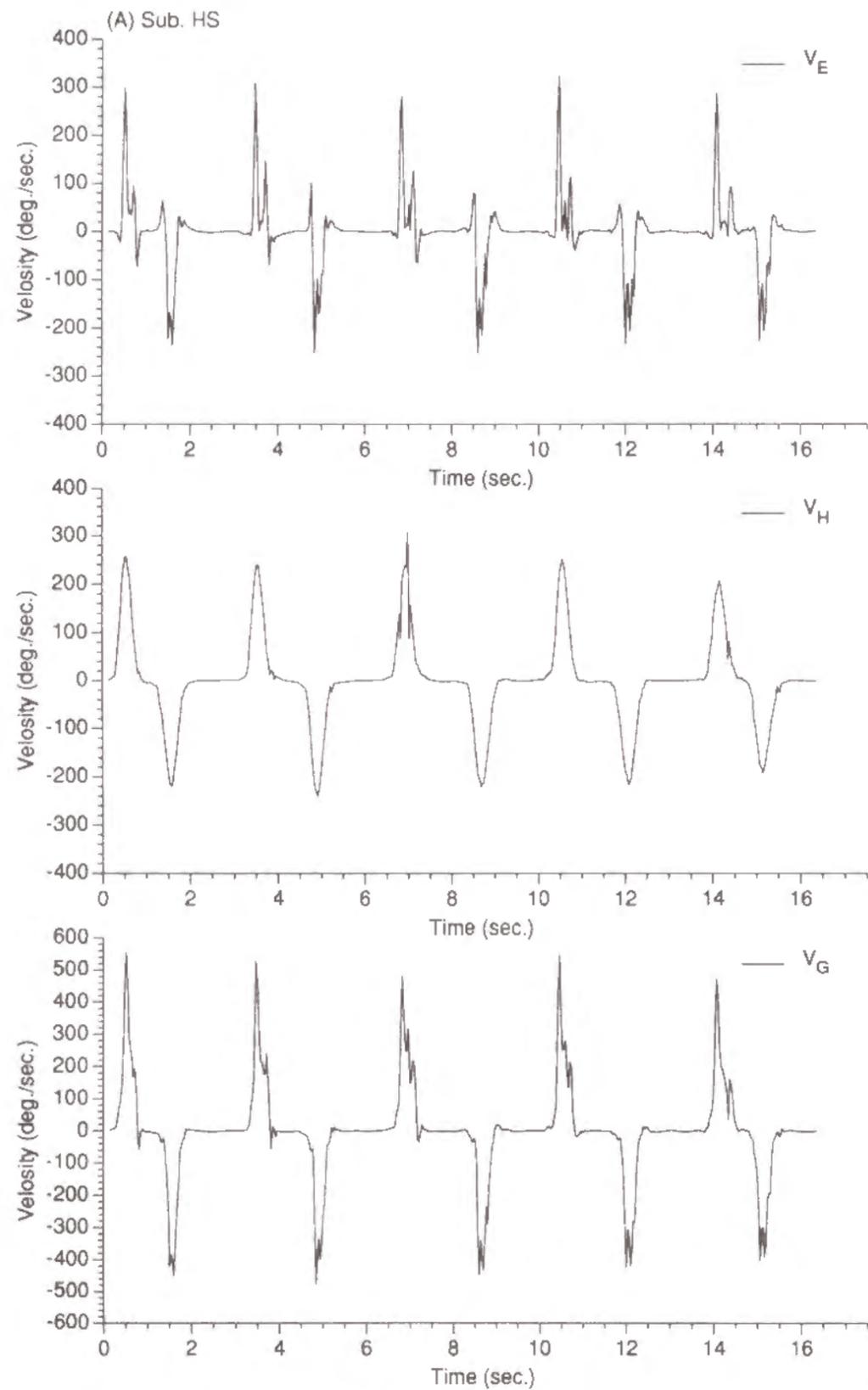


図4-7(A) 刺激間隔 $90^\circ$ での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。被験者HS。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。

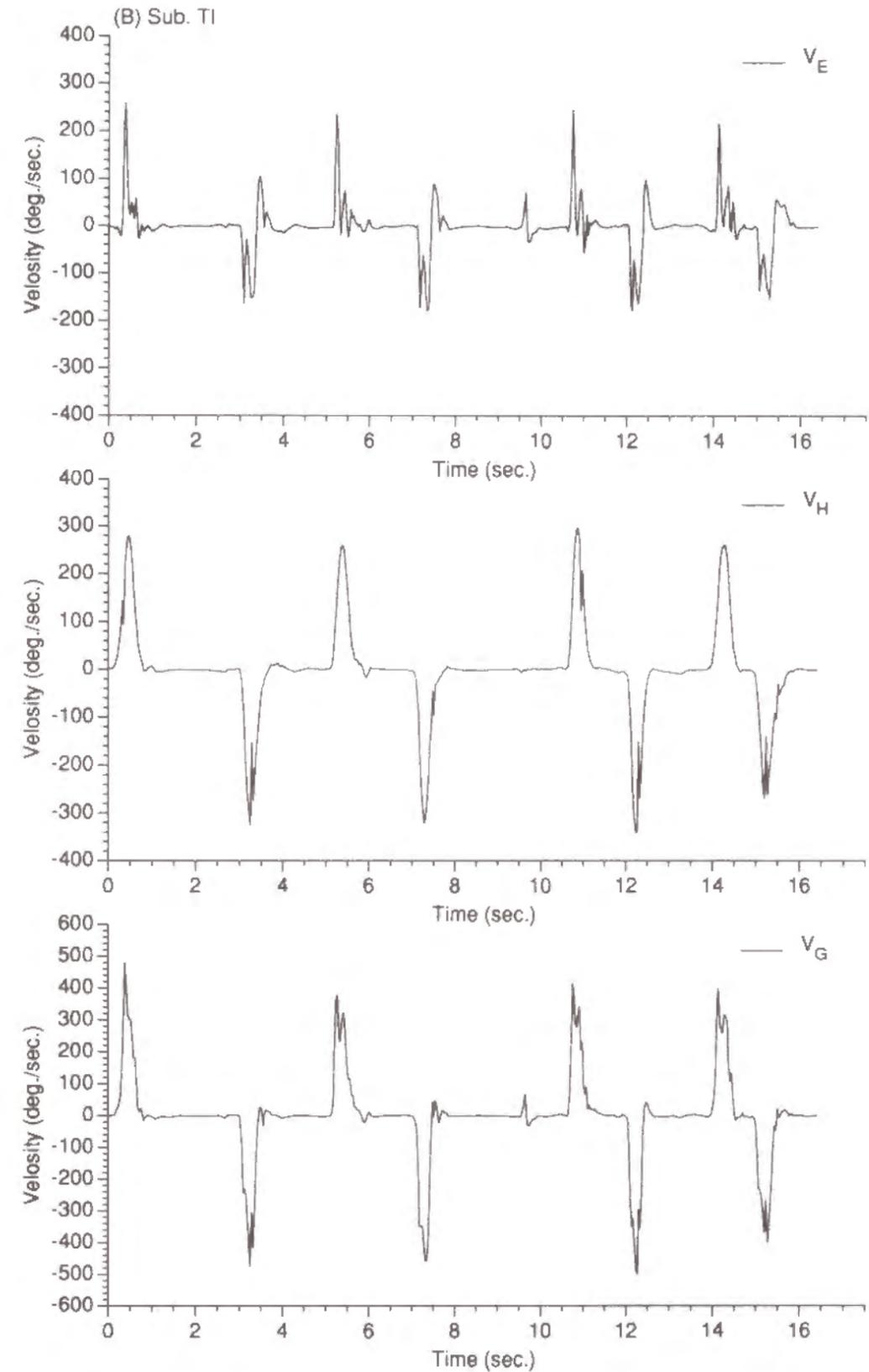


図4-7(B) 刺激間隔 $90^\circ$ での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。被験者TI。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。

速度のグラフからは、これまで説明してきた眼球と頭部の特徴的な協調動作がより明確に示されている。例えば被験者HSのV<sub>e</sub>のグラフで、12秒付近の参照刺激から等色刺激への視点移動（負方向へのピーク）に注目すると、まずサッケードに先だつ逆方向への眼球運動（直前のVOR）があり、それから大きく負方向に動き出している。また視点移動中の速度は3つのピークからなっており、多段階のサッケードが起きていることを示している。さらに視点移動完了後のVORが逆向きの小さなピークで表されている。被験者TIでもこれらの特徴は観察されている。ただし、直前のVORは小さく、このグラフからは分かりにくい。

両被験者とも刺激間隔60°以上の条件においてはサッケード前後のVOR、多段階のサッケードが観察されている。そこで刺激間隔60°以上での等色作業時の視点移動の様子を模式的に表わすと図4-8になる。

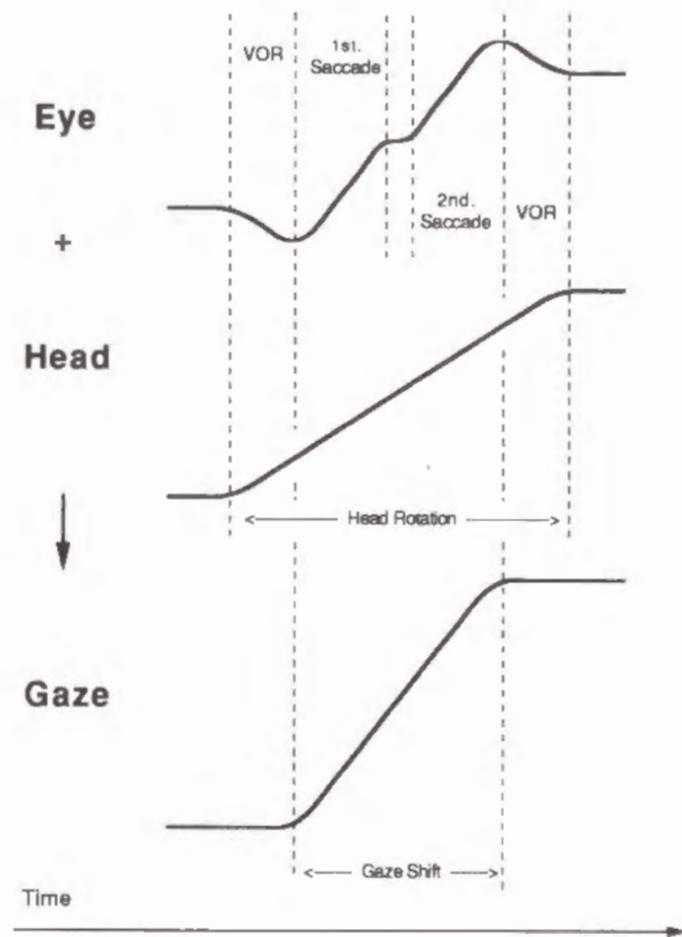


図4-8 視点移動量60°以上での眼球と頭部の動き。

まず頭部Hが順方向に、同時に眼球Eが逆方向に動きだす。その時点では、このVORのために視点はまだもとの位置に残っている。次に眼球も順方向にサッケー

ドを開始し、視点も移動し始める。眼球の回転速度は頭部に比べて大きく、頭部を追い越して先に次の場所に到着する。ただしこの時、移動量が大いときは多段階のサッケードになる。眼球が到着した時点で視点の移動は完了している。遅れて頭部が到着するので視点を止めておくために逆方向に眼球が回転（VOR）し、頭部回転の終了をもってこの一連の動作を完了する。

以上の特徴的な眼球と頭部の協調運動の有無を刺激間隔別に調べ、表4-1にまとめた。表中では観察されなかった場合を×、観察された場合を△、ほぼ毎回の視点移動時に観察されている場合は○で表現した。

表4-1 頭部回転、サッケード前後のVOR、多段階サッケードの有無。

×：観測されなかった場合、△：観測された場合、○：すべての視点移動時に観測された場合

Sub. HS

Stimuli Separation	Head rotation	Postsaccadic VOR	Presaccadic VOR	Multiple Saccades
6°	×	×	×	×
15°	×	×	×	×
30°	△	△	×	×
60°	○	○	○	○
90°	○	○	○	○
120°	○	○	○	○

Sub. TI

Stimuli Separation	Head rotation	Postsaccadic VOR	Presaccadic VOR	Multiple Saccades
6°	×	×	×	×
15°	△	△	×	×
30°	○	○	△	△
60°	○	○	△	○
90°	○	○	△	○
120°	○	○	△	○

視点移動後のVORは頭部回転の導入と同時に始まる眼球運動であるが、直前のVORや多段階のサッケードはより大きな移動量にならなければ起こらないことが分かる。このように、大きく視点を移動するときにはかなり複雑な眼球運動を遂行していることが分かる。しかし刺激呈示条件や被験者のタスクが変わればこの限りではない。特に刺激呈示の変化にあわせて強制的に視点を移動させ

る場合では、移動するタイミングや移動量が既知かどうか、またできる限り素早く視点移動する必要があるかどうかなどに大きく依存する (Zangemeister and Stark 1982)。本実験では刺激は定常的に呈示されており、視点移動は被験者の自由なペースに任されている。また被験者は特に視点移動自体に注意を払っているわけではない。したがって、本研究で得られた等色中の視点移動の特徴が、他の視覚作業や呈示条件での視点移動にも一般的に当てはまるかどうかは分からない。

#### 視点移動量に占める眼球と頭部の回転量

図4-7を見て分かるように、視点移動時は $V_0$ が0 (ゼロ) から離れピークを形成する。したがって、この $V_0$ のグラフを基にして視点移動開始時刻と終了時刻を求めることができる (Morasso, Bizzi, and Dichgans 1973)。今回は加速時に $V_0$ の絶対値が6.1 (deg/sec) を越える直前のフレームを視点移動開始時刻 ( $T_s$ ) とし、減速時に $V_0$ の絶対値が6.1 (deg/sec) 以下になるフレームを移動終了時刻 ( $T_e$ ) とした。また視点移動のエラー修正のため $V_0$ は0 (ゼロ) 付近を何回か振動することがあるが、そのような場合は修正運動を含めて最終的に視点が停止 ( $V_0$ の絶対値が6.1 deg/sec 以下) した時点を終了時刻とした。視点移動に要する時間は $\Delta T = T_e - T_s$ となり、視点の移動量を $\Delta G$ 、視点移動における眼球および頭部の回転量をそれぞれ $\Delta E$ 、 $\Delta H$ とすると $\Delta G = |G(T_e) - G(T_s)|$ 、 $\Delta E = |E(T_e) - E(T_s)|$ 、 $\Delta H = |H(T_e) - H(T_s)|$ と表わせる。

図4-9に、両被験者の眼球と頭部の回転量を視点移動量の関数として表示した。横軸が視点移動量で、縦軸が眼球および頭部の回転量である。 $\Delta E$ は被験者HSが○、被験者TIが●で表わされている。また $\Delta H$ は被験者HSが□、被験者TIが■で表わされている。視点移動量が十分に小さいときは眼球運動だけで足りる。しかし眼球の最大回転量 $\Delta E_{max}$ を越えると頭部を回転して補うようになる。したがって、 $\Delta G$ の増大に伴って、 $\Delta E$ は $\Delta E_{max}$ までは傾き1で増加してゆき、 $\Delta E_{max}$ 以上では一定になるであろう。一方 $\Delta H$ の方は $\Delta E_{max}$ 以下で0 (ゼロ)、 $\Delta E_{max}$ 以上で傾き1の直線になると考えられる。その考え方に基いて、最小2乗法で近似したものが図中の破線 (被験者HS) および実線 (被験者TI) である。 $\Delta E_{max}$ はHSで29.0°、被験者TIで22.4°であった。被験者TIのほうが早い段階で頭部回転を導入している。Sanders(1970)は刺激間隔が約50°以上にならないと報告している。これは彼の実験では、被験者に課せられているのは光点の数を比較する作業であり、周辺視でも充分に対応できたからと思われる。

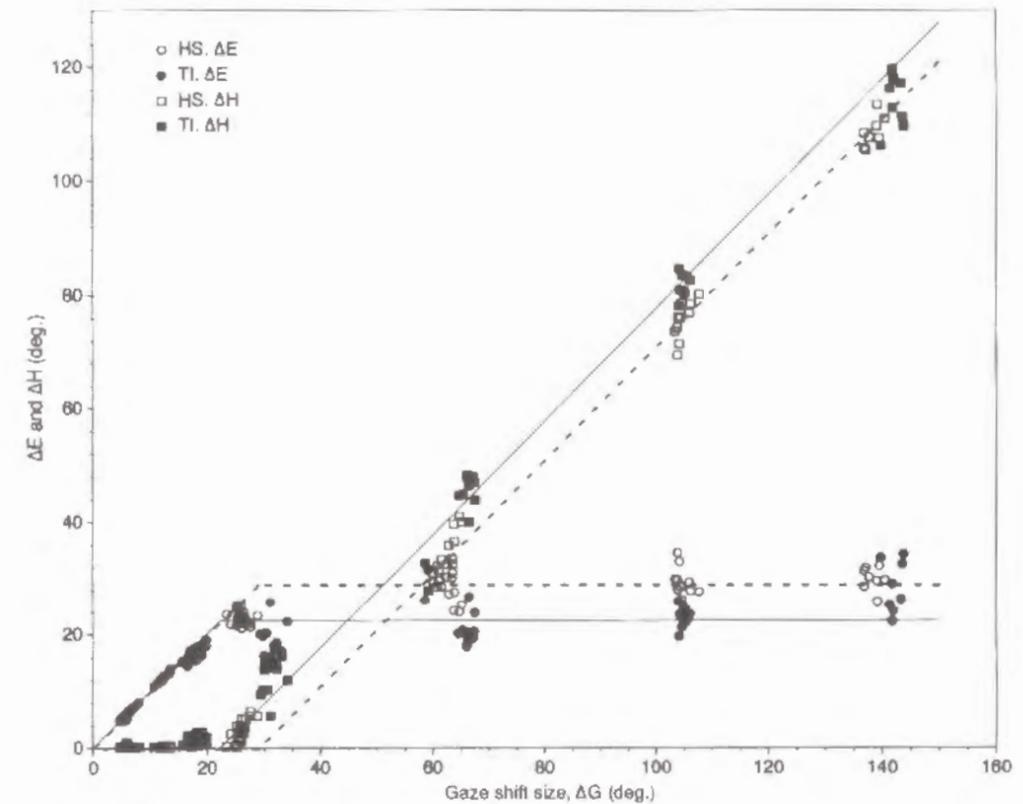


図4-9 視点移動量 ( $\Delta G$ ) の関数としての眼球 ( $\Delta E$ ) および頭部 ( $\Delta H$ ) の回転量。  
○:  $\Delta E$  被験者HS、●:  $\Delta E$  被験者TI、□:  $\Delta H$  被験者HS、■:  $\Delta H$  被験者TI。破線 (HS) と実線 (TI) は近似直線。

#### 視点移動に要する時間

図4-10に移動に要する時間 $\Delta T$ を、視点移動量 $\Delta G$ の関数として表示した。横軸が $\Delta G$ 、縦軸が $\Delta T$ である。○が被験者HS、●が被験者TIを示し、平均値を破線 (被験者HS) および実線 (被験者TI) の折れ線で結んだ。比較のため、Land (1992)の2人の被験者 (一点鎖線) とSanders(1970)の2つの被験者グループ (点線) の結果も併せて表示した。両被験者とも右上がりの傾向を示しており、視点移動量の増大に伴って $\Delta T$ が増大していることを示している。しかし線形ではなく、飽和する傾向がある。また、Land(1992)やSanders(1970)の結果に比べるとかなり大きな値になっている。Land(1992)は自動車運転中、それも交差点突入時のドライバーの視点移動を解析している。 $\Delta T$ は $\Delta G$ とは非常によい相関を示し、直線で近似できる (図中の一点鎖線)。Sanders(1970)の実験では、被験者は離れた光点群の数を比較し報告する。そしてこの作業が制限時間内に何回できるかを測定している。 $\Delta T$ と $\Delta G$ は線形の関係にあることが分かる。また両方ともサッケード直前のVORに関する記述は特になかった。

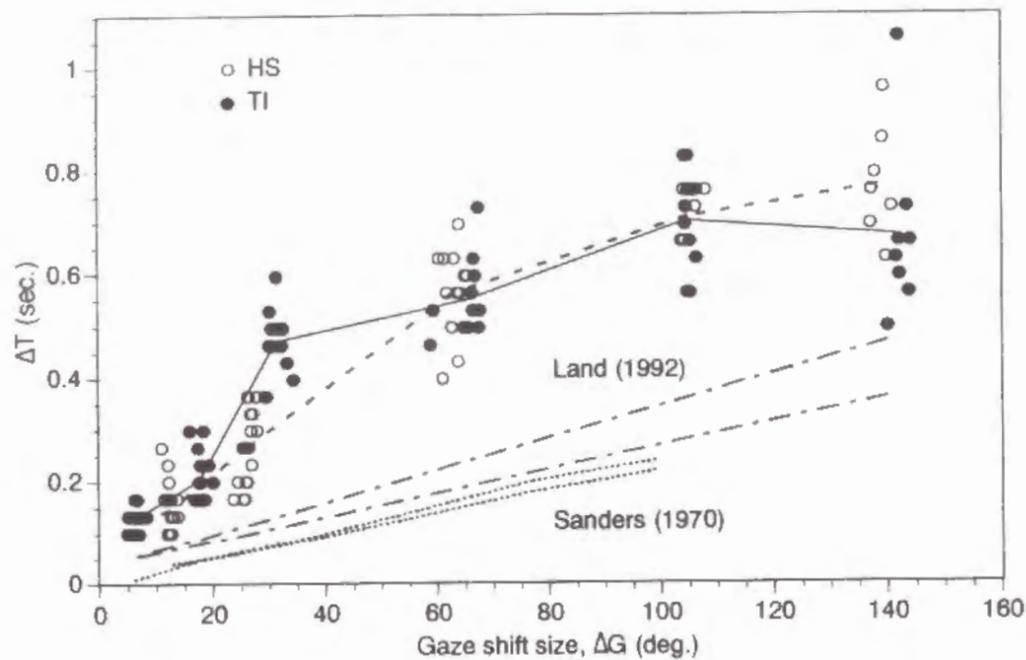


図4-10 視点移動量(ΔG)の関数としての視点移動に要する時間(ΔT)。

○:被験者HS、●:被験者TI。平均値を折れ線で示した。破線:被験者HS、実線:被験者TI。  
一点鎖線:Land(1992)の2人の被験者の結果(近似直線)、点線:Sanders(1970)の2グループの結果(平均値)。

我々の測定したΔTがLand(1992)やSanders(1970)のそれに比べて大きな値になった理由の一つに、視点移動エラーの修正にかかる時間をもΔTに含めていることが考えられる。しかしLand(1992)やSanders(1970)の報告にエラー修正の記述はなく、その点の確認はできない。また被験者の実験に臨む態度の違いが影響している可能性もある。すなわち、運転時は細かい情報抽出よりも大まかな情報を短時間で広い範囲から取り入れることが要求されるため、素早く視点を移動し、注視時間も短くしなければならない。またSanders(1970)のタスクも被験者の素早い視点移動が要求されている。それに対して我々の実験では時間制限はなく、被験者に特に素早い視点移動も要求していない。そのためにΔTが大きくなったとも考えられる。しかし、視点移動に要する時間ΔTは被験者の視覚作業の内容に依存すると理解することもできる。つまり「そもそも色弁別でのΔTは、自動車の運転や光点数の比較作業に比べて大きい」とも解釈できる。しかしその原因が、色弁別作業では、これ以上のΔTの短縮ができないためなのか、ΔTの大きさがそれほど重要でないためなのかは分からない。また、今回ΔTが線形的ではなく、大きい視点移動量ΔGにおいて上昇率が鈍っているのは、視点移動前のVORが働いているためである。すなわち、頭部回転開始直後の逆向きの眼球運動により注視時間を延長し、速度の遅い頭部の代わりに速度の速い眼球の回転量を増やしてΔTを短縮していることが分かる。

#### 4.3.4 等色精度との相関

ここでは、この実験で得られた各種の測定値と、前回の実験1で得られた等色精度との相関について検討する。右上がりの傾向を示した $T_c$ (1回の比較にかける時間)、 $\Delta T$ (視点移動に要する時間)、 $\Delta E$ (眼球の回転量)について検討した。その結果を図4-11に示す。左から刺激間隔、 $T_c$ 、 $\Delta T$ 、 $\Delta E$ と並んでいる。縦軸は95%等色楕円体体積の立方根。横軸 $T_c$ 、 $\Delta T$ 、 $\Delta E$ は本実験で得られた測定値を被験者別に平均した値である。縦軸、横軸とも刺激間隔 $6^\circ$ での値を1とする相対値で表示している。両被験者あわせて12点になるが、刺激間隔 $6^\circ$ 、つまり横軸=縦軸=1で2点が重なるので図上では11点になる。実線は最小2乗法による近似直線である。相関係数は $\Delta E$ が最も高く0.804、次に刺激間隔と $\Delta T$ で各々0.718、0.708、 $T_c$ が最も低く0.646となった。グラフからも(D)は他に比べて直線近くに分布していることが分かる。Sanders(1970)の報告では約 $50^\circ$ 以上で頭部回転が観測されていたため、本研究でも測定前は $\Delta E$ との相関が期待された。しかし色弁別では中心窩での作業となるため、かなり早く(被験者HSで $29.0^\circ$ 、被験者TIで $22.4^\circ$ )から頭部回転が始まっており、期待されたほどの相関は得られなかった。

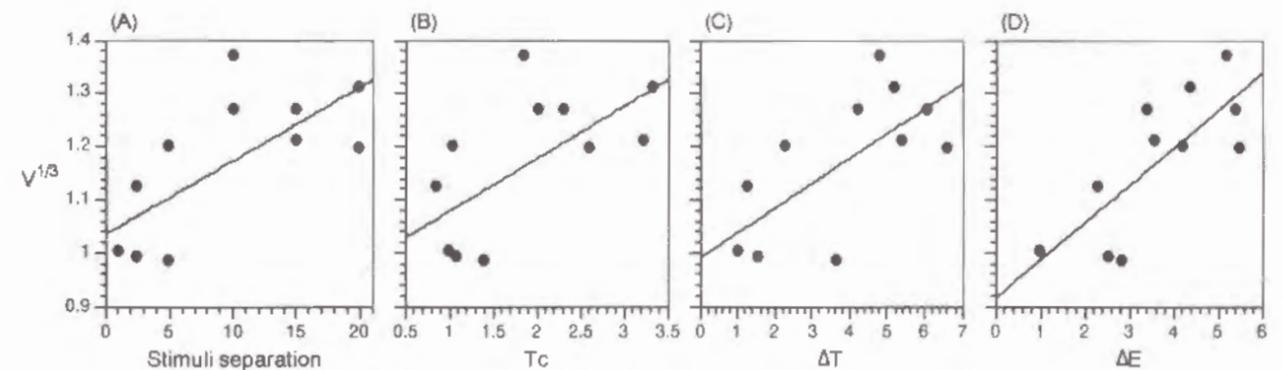


図4-11 刺激間隔、比較時間 $T_c$ 、視点移動時間 $\Delta T$ 、眼球回転量 $\Delta E$ と等色精度( $V^{1/3}$ )との相関。縦軸の値は $V^{1/3}$ 。横軸は刺激間隔(A)、1回の比較にかける時間 $T_c$ (B)、視点移動に要する時間 $\Delta T$ (C)、眼球の回転量 $\Delta E$ (D)。刺激間隔 $6^\circ$ での値を1とする相対値で示した。黒点は両被験者の結果、実線は回帰直線。

#### 4.4 まとめ

空間的に離れた刺激を等色しているときの、被験者の観察方法を探るために、等色作業中の視点の動きを測定した。等色が完了するまでの時間は刺激間隔が広がってもほぼ一定、しかし観察回数は減少し、1回の観察にかかる時間は増大していた。これは無意識下での、視覚系の戦略変化を示している。被験者HSでは30°以上、被験者TIで15°以上で視点移動のために頭部を回転していた。頭部回転を必要とする状況では常にサッケード直後のVORが観察された。さらに60°以上ではサッケード直前のVORや多段階のサッケードも観察された。視点移動に要する時間は間隔に伴って増大していた。しかし、他の視覚作業に比べて値が大きく、比較的ゆっくりと視点移動していることが分かった。また、刺激間隔の増大に対して飽和してゆく非線形の形状を示した。

## 第5章 等色の繰り返し精度における刺激間の時間ギャップの影響\*

### 5.1 実験目的

第3章では大きな視点移動を伴う状況での色弁別能力を調べるために、2刺激の間隔を変えて等色の繰り返し精度を測定した。刺激間隔（中心間の距離）を6°から120°の範囲で変化させたところ、間隔の増大に伴って60°付近までは精度が低下し、それ以上ではほぼ一定となる傾向を示した。色弁別や等色作業には細かい色の差を見分ける能力が反映されるため、色知覚特性の良い網膜中心窩の色情報が重要な意味を持つ。したがってもしも網膜中心窩の物理的条件だけで色弁別閾値が決まるなら、刺激の空間的な間隔を変えたときの色弁別能力の変化は視点移動に要する時間、つまり刺激呈示の時間間隔で説明できる。

色弁別の時間特性に関する研究としては、恒常法によるものでUchikawa and Ikeda(1981)、Romero, Hita, and Jimenez del Barco(1986)、等色法ではUchikawa and Ikeda(1986)、Newhall, Burnham, and Clark(1957)がある。いずれも同時比較時に比べて継時比較時の色弁別能力は低いことが示されている。Uchikawa and Ikeda(1981)では2刺激の時間間隔はSOA (stimulus onset asynchrony、片方の刺激の呈示開始からもう一方の刺激の呈示開始までの時間間隔)で0~5450msec.であるが呈示時間が110msec.と等色作業中の注視時間に比べて極端に短い。その他の研究では時間間隔が5秒以上であり、むしろ色記憶の領域に入ると思われる。またどれも観察が1回だけであるとか呈示時間が決められているなどの制限がある。

そこで本研究では被験者が自由に観察できる状況において、刺激呈示の時間的ギャップを変えて等色の繰り返し精度を測定する。そして刺激が空間的に離れているときに見られる色弁別能低下の原因が、視点移動による時間的ギャップにあるのか確かめる。

### 5.2 実験

#### 装置

等色刺激呈示用のバーンハム色彩計、参照刺激呈示装置は、ともに150Wのハロゲンランプの光源と色フィルタにより構成されている。2.2に記述の装置に呈示時間を制御するためのシャッター、およびタイマ部が増設されている。シャッターは、それぞれ色彩計中のウェッジフィルタ直前、参照刺激呈示装置中の色フィルタ手前に配置された。被験者は色彩計の3つのノブと刺激呈示をコ

\*篠田博之、池田光男：継時呈示における等色繰り返し精度に対する時間ギャップの影響、照明学会誌、78-10、pp.560-567 (1994)に掲載。

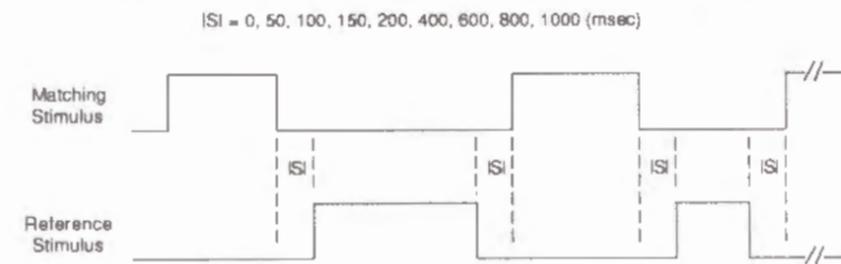
ントロールするボタンを操作する（図2 5参照）。

### 呈示条件

被験者から刺激までの距離は約50cm。参照刺激、等色刺激はともに一辺2°の正方形で、中心間隔は6°に固定されている。ブース内は無照明で、両刺激は光源色モードの見えになる。刺激の呈示条件を図5-1に示す。一つは継時呈示条件である。始め等色刺激のみが呈示されているが、被験者がボタンONと同時に等色刺激が消え、ある時間の後、参照刺激が呈示される。ボタンONの間、参照刺激は呈示され続ける。ボタンを離すと同時に参照刺激が消え、またある時間間隔の後に等色刺激が呈示される。被験者は等色するまでこれを繰り返す。

観察時間は被験者が自由にコントロールできるため、2刺激の時間間隔はSOA (stimulus onset asynchrony、片方の刺激の呈示開始からもう一方の刺激の呈示開始までの時間間隔)ではなく、ISI (inter stimulus interval、片方の刺激の呈示終了からもう一方の刺激の呈示開始までの時間間隔)で定義する必要がある。以後、本研究では刺激呈示の時間間隔および時間ギャップという語はこのISIを指すものとする。時間間隔 (ISI) は視点移動に要する時間と同程度とするため、実験4の結果を参考に0、50、100、150、200、400、600、800、1000 msec. の9条件とした。もう一つの呈示条件は同時呈示条件であり、ボタンを押しても参照刺激が呈示されるだけで等色刺激は消えない。実験1から実験3の刺激間隔6°と等価な条件であり、コントロールとしてこの条件を加えた。以上、刺激呈示条件は全部で10条件となる。

#### Successive Presentation with Inter Stimulus Interval (ISI)



#### Simultaneous Presentation

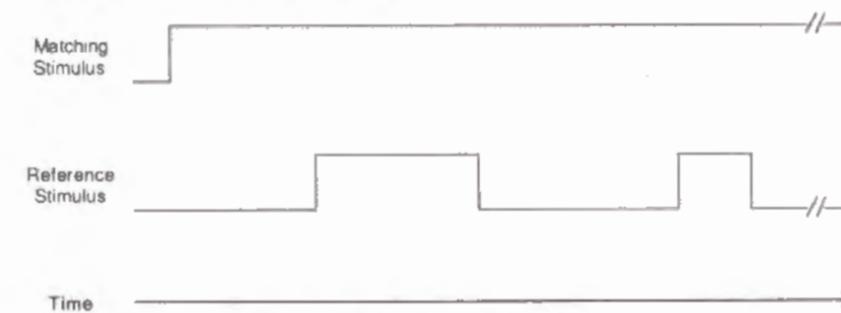


図5-1 刺激の時間呈示条件。

### 刺激、被験者

参照刺激は実験1と同様のYellow-Green、Orange、Purpleと今回新たに加えたAchromaticの4種類である。Achromaticにはフジフィルム社製の色フィルタND-0.7 (1枚)とLBB-2 (2枚)の計3枚を重ねて用いた。なお、分光透過率を付図A-3に記載した。3参照刺激の、ミノルタ社製CS-100による実験終了後の測色値を表5-1に示す。被験者は27才の男性HS1名で、実験1から実験4に参加している被験者である。

表5-1 参照刺激の測色値 (CIE1931xy色度座標、および輝度)。

参照刺激	x	y	Y (cd/m <sup>2</sup> )
Yellow-Green	0.396	0.543	179.0
Orange	0.616	0.355	39.7
Purple	0.380	0.212	46.2
Achromatic	0.396	0.401	51.1

### 手順

測定は実験1、2、3と同様の手順に沿って行なわれた。被験者はブース内で数分間の暗順応の後、等色作業を開始する。等色が終了したら実験者は色彩計の読みを記録する。その後、被験者は自分で等色を崩し、次の等色作業に入る。等色は5回続けて繰り返す (1ブロック)。1ブロックが終了したら参照刺激を取り替えて同様の作業を行なう。1セッションは4種類の参照刺激に対する等色 (4ブロック) で構成され、セッション内の呈示条件およびISIは一定とした。各参照刺激、各呈示条件に対し計50回の等色となるように、全部で100セッションの実験を行った。

### 5.3 結果

#### 5.3.1 95%等色楕円体

色彩計の読みからCIE1931xy色度座標値、輝度値Y (cd/m<sup>2</sup>)に変換し、x、y、Yの各ブロック毎の平均値と全体50回の平均値を計算する。さらに各ブロックの平均値が全体50回の平均値に重なるように各ブロック毎に5点をxyY空間内で平行移動する。平行移動後の等色点に対し統計処理を施し、3次元の正規確率分布で近似する。そして95%の確率分布を包括するように楕円体を決定する。データ処理および等色楕円体の導出方法は2.1.3に詳細に記述されている。

得られた全等色点と楕円体を図5-2~図5-5に示す。

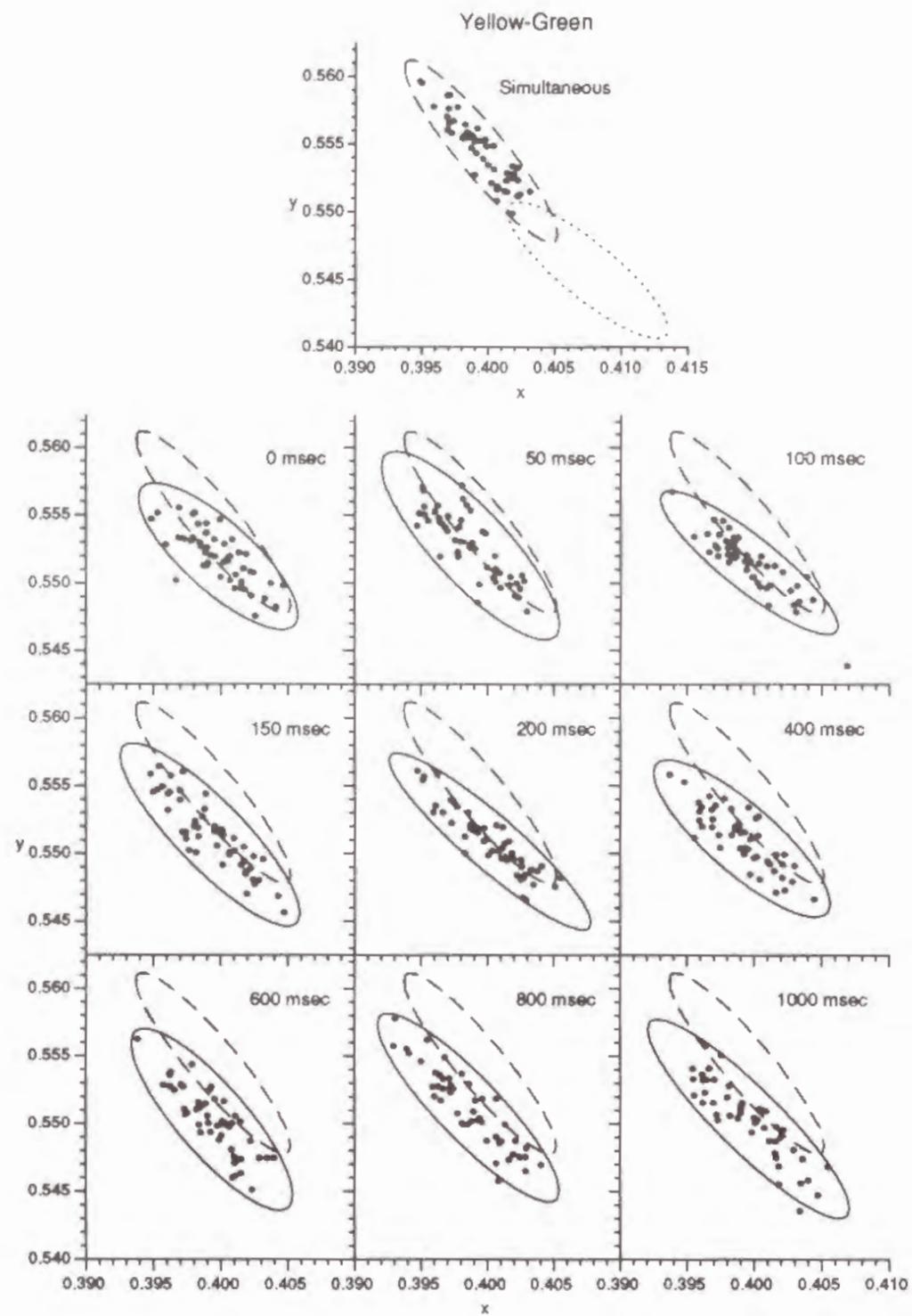


図5-2 参照刺激Yellow-Greenに対する等色楕円体。  
 黒点：等色点のxy色度平面への投影、楕円は等色楕円体の中心を通る等輝度断面、  
 破線：同時呈示条件、実線：継時呈示条件。被験者HS。

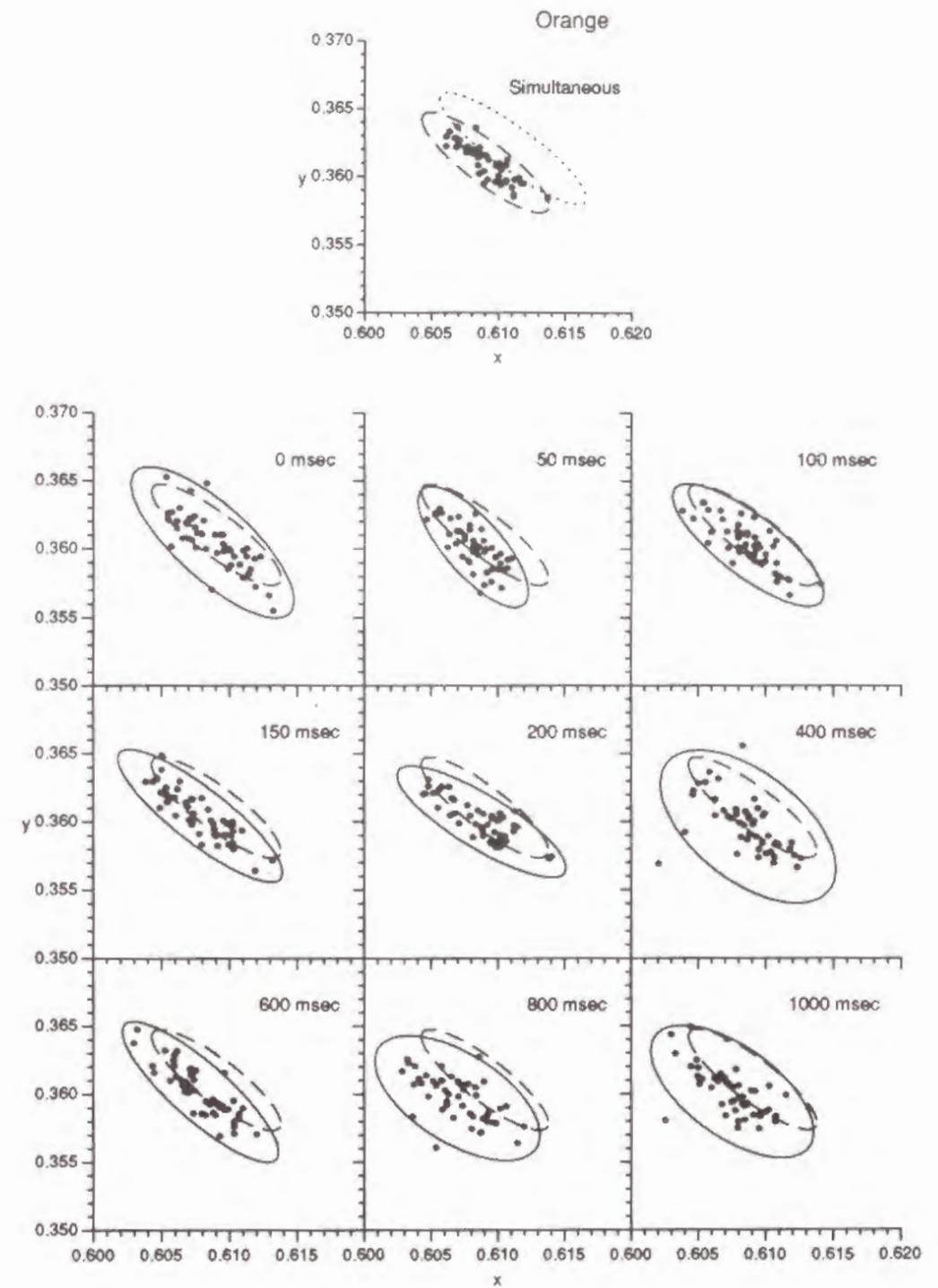


図5-3 参照刺激Orangeに対する等色楕円体。

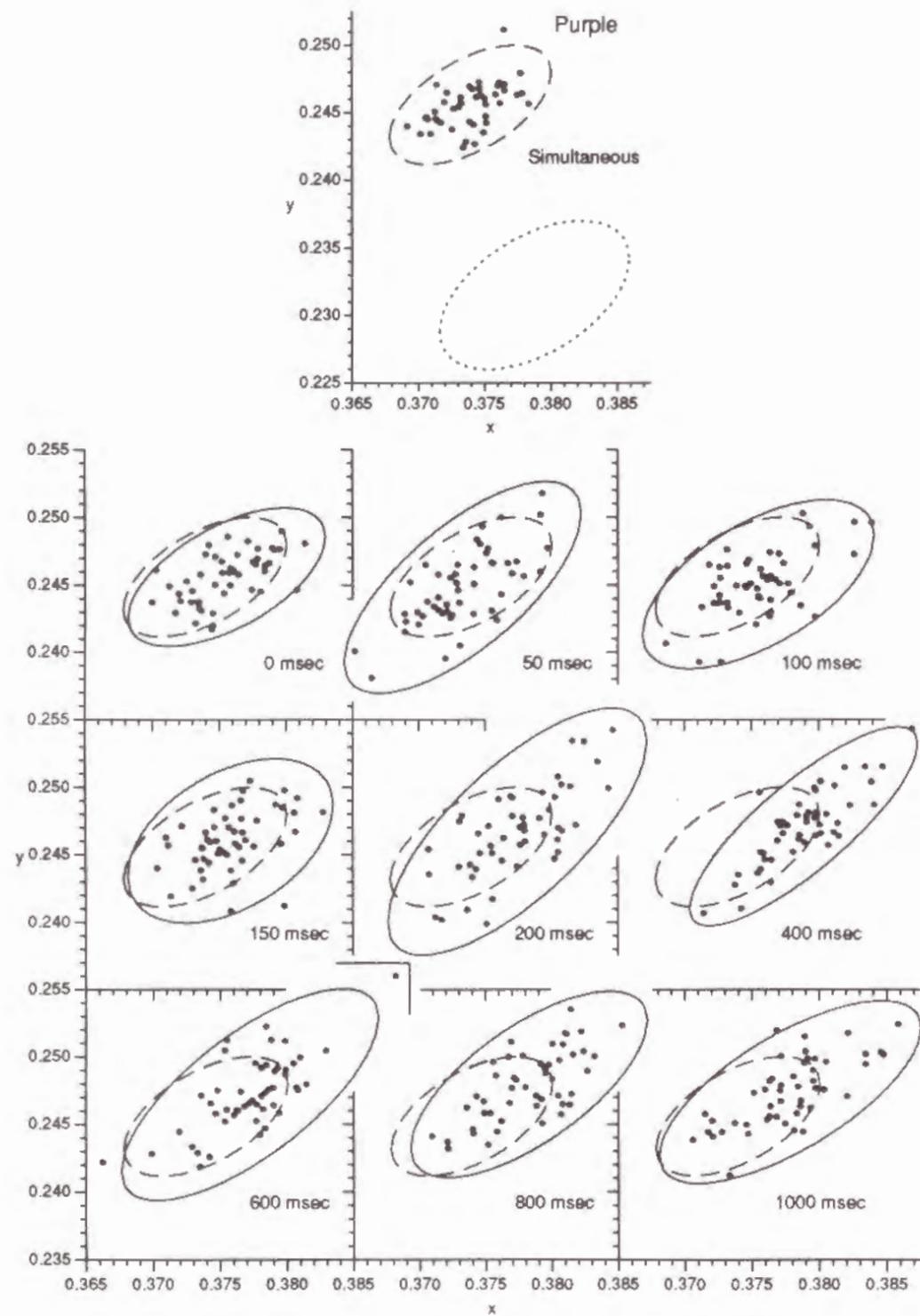


図5-4 参照刺激Purpleに対する等色楕円体。

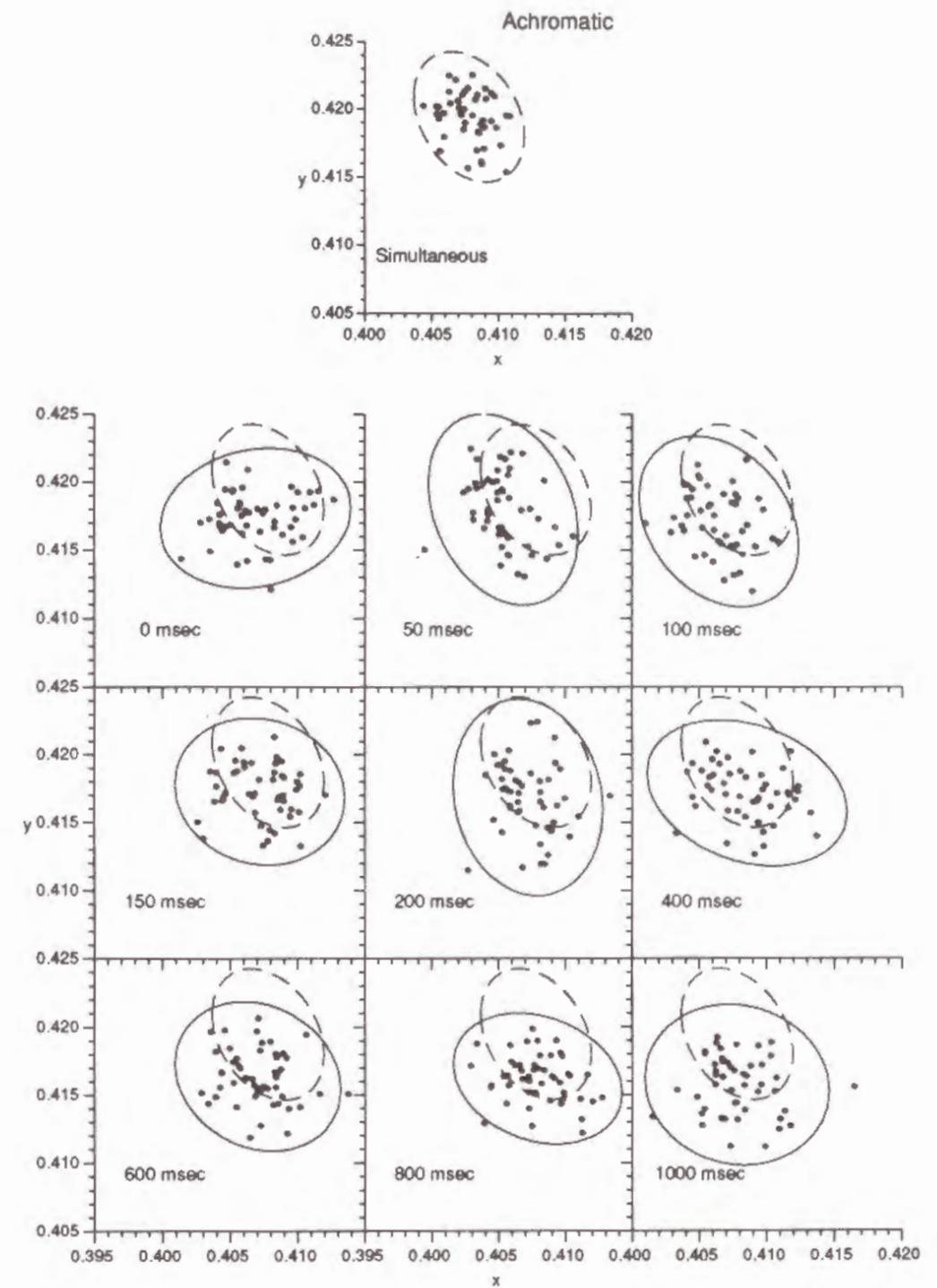


図5-5 参照刺激Achromaticに対する等色楕円体。

一番上のグラフは同時提示条件によるもの、下のグラフは継時提示条件によるものである。いずれの楕円も楕円体の中心を通る等輝度での断面で、点は等色点のxy平面への投影を示す。また比較のため、継時提示条件のグラフに、同時提示条件の楕円を破線で表示した。さらに、図5-2~図5-4の同時提示条件のグラフには実験1の刺激間隔6°での楕円を点線で表示した。

図5-2はYellow-Greenに対する等色の結果である。本実験での同時提示と実験1の刺激間隔6°での楕円は、中心位置はずれているものの、大きさはほぼ等しい。本実験の範囲内で楕円を比較してみても、条件に依らず楕円の向きに大きな変化は見られない。また同時提示条件とISI100msec.条件で僅かに等色点が密に分布している程度で、楕円体の大きさも殆ど変化していないと言える。

図5-3のOrangeでは、同時提示と実験1の刺激間隔6°の楕円では中心位置のずれに加えて、大きさもわずかに小さくなっている。下段のグラフからは、どのISIにおいても継時提示条件に比べて同時提示条件の楕円が小さいことが分かる。楕円近似の弱点であるが、正規分布を仮定するために、得られる楕円体は中心から遠く離れた1点の影響を受け易い。特にISI 400、800、1000msec.条件で楕円が大きくなっているのはこのためである。

図5-4のPurpleでは点線と破線の楕円の位置が大きくずれている。さらに点線よりも破線の楕円の方が小さい。下段グラフでは他の参照刺激と同様に、同時提示条件の楕円が他に比べて小さい。ISIによって楕円の大きさに変化はあるものの、システマティックなものではない。

図5-5はAchromaticであるが、条件によって楕円の向きが一定していない。これは等色点分布に偏りが少ない、つまり円に近い分布をしているからであろう。大きさには大きな変化は見られない。ただし、他と同様に同時提示条件の楕円が小さい。

実験1の刺激間隔6°での楕円と本実験の同時提示は等価な条件であるが、図5-2~5-4の上段グラフが示すように、楕円の中心位置や大きさに変化が見られた。位置のずれは2.1.3で述べたような色フィルタの経年変化のためと考えられる。また大きさに関しては、いずれも実験1より小さくなる方向に変化しており、3.1.3の個人差の原因で述べたように、等色作業の経験を積むことによる学習効果によって精度が向上したものと考えられる。

### 5.3.2 等色中心位置

楕円体中心、つまり等色中心位置の変化にある傾向が見られたので図5-6にそれを示す。楕円は同時提示条件のもので、中心点を同時提示、ISI 0msec.、50msec.、100msec.・・・と順に折れ線で結んでいる。Yellow-Greenでは同時提示から継時提示、さらにISIの増大に伴って等色位置がy座標減少の方向に移動している。Orangeでは左下方向つまりx、yともに小さくなる方向に、Purpleではその逆方向に、Achromaticではyの減る方向に各々移動している。変化の大

きさは僅かで、楕円を大きく外れるものではない。図5-6の下段に変化方向を矢印で示すと、彩度低下の方向に移動していることが分かる。輝度方向に関しては殆ど変化が見られなかったので図は割愛する。

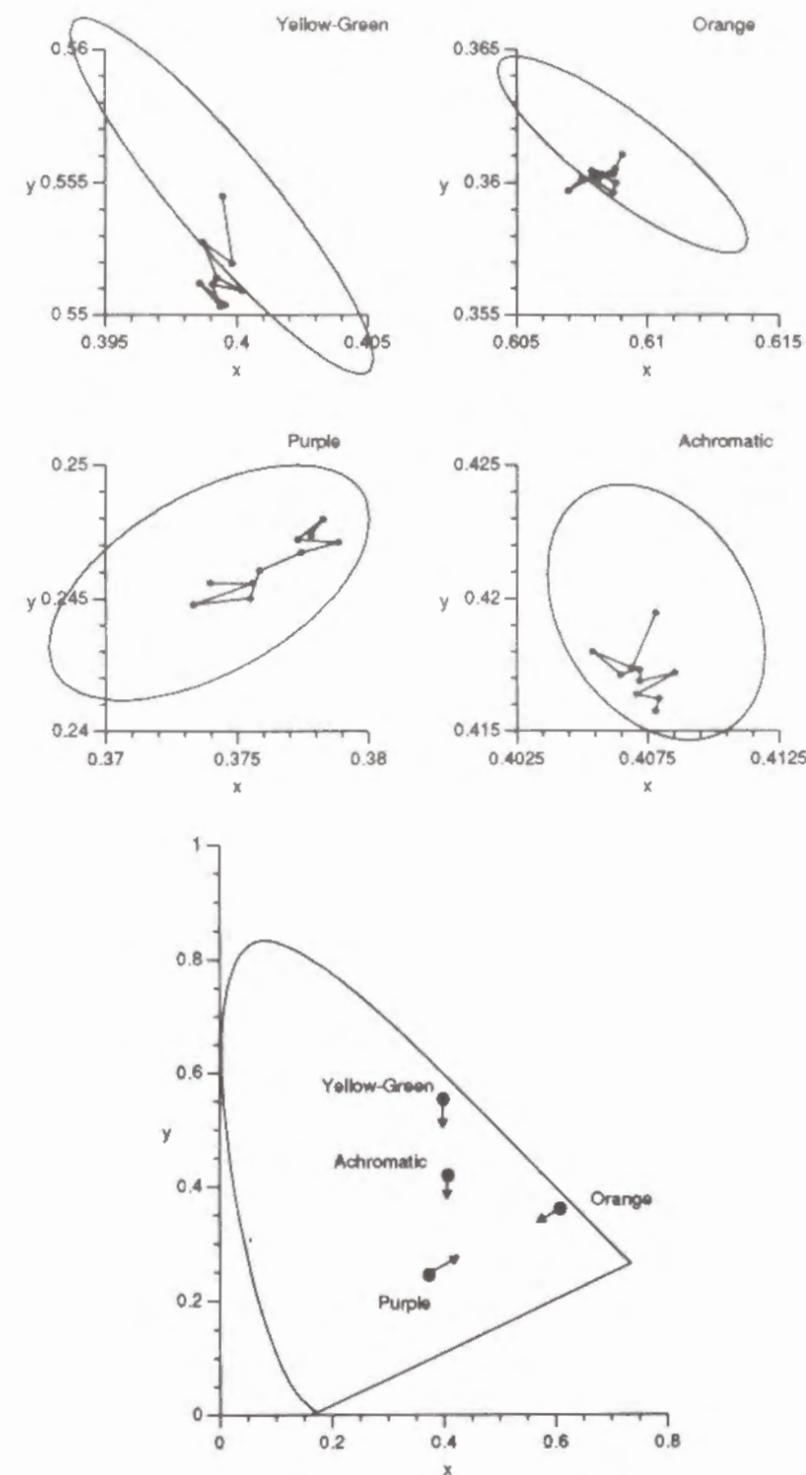


図5-6 等色中心位置の変化。

楕円体の中心を同時提示、ISI 0msec.、50msec.、100msec.・・・の順に折れ線で結んでいる。楕円は同時提示で得られたもの。下段にずれの方向を矢印で示した。

これとは逆に、Newhall, Burnham, and Clark(1957)では、同時等色に比べて記憶等色のときは高い彩度で等色していた。また、実験1で空間的なギャップを変えたときには今回のような傾向は見られなかった。本実験も被験者1人だけであり、低彩度方向に移動するという傾向が一般的とは断定できない。

### 5.3.3 等色楕円体の大きさ

等色の繰り返し精度を与える指標として95%等色楕円体の体積 $V$ 、中心を通る等輝度断面の楕円面積 $A$ 、輝度軸方向の径 $dY$ を考える。図5-7の上段に体積 $V$ 、面積 $A$ 、径 $dY$ をISIの関数として表示した。上段のグラフでは値そのものを縦軸にとっている。シンボルの違いで参照刺激の違いを表わしている。また白抜ききのシンボルは同時呈示条件を表わしている。

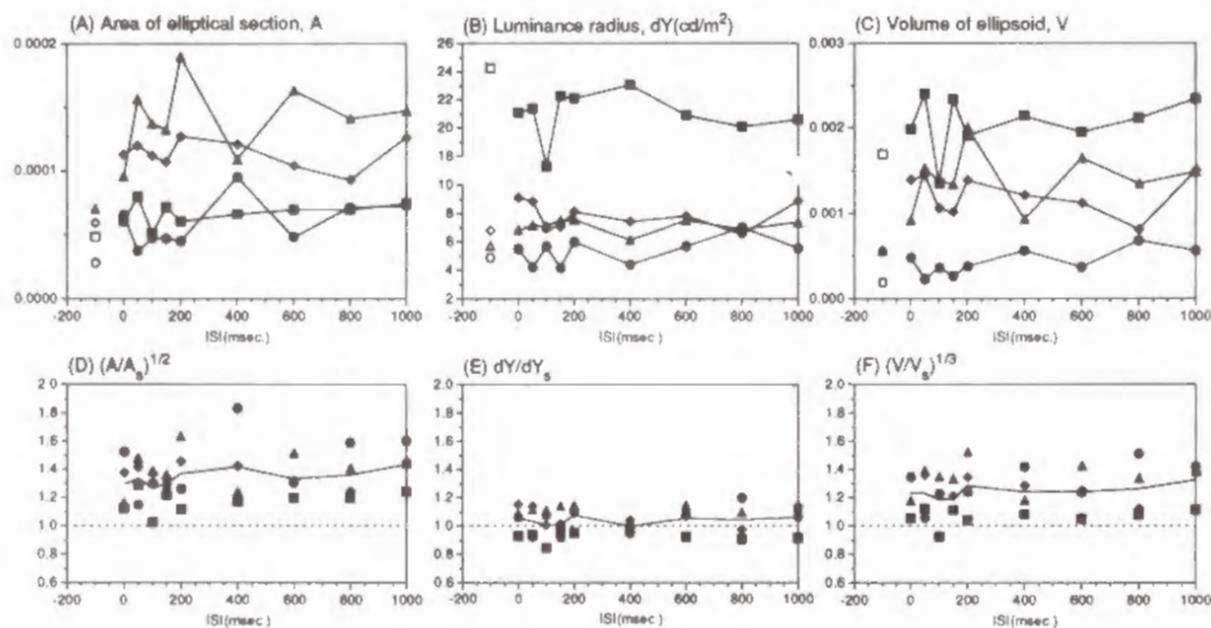


図5-7 ISIの関数としての等色楕円体の大きさ変化。

(A) 楕円面積 $A$ 、(B) 輝度軸方向の径 $dY$ 、(C) 楕円体体積 $V$ 、(D) 楕円面積 $A$ の同時呈示での値 $A_s$ に対する相対値の平方根 $(A/A_s)^{1/2}$ 、(E)  $dY$ の同時呈示 $dY_s$ に対する相対値 $dY/dY_s$ 、(F) 楕円体体積の相対値の立方根 $(V/V_s)^{1/3}$ 。黒シンボルは継時呈示での値、■：参照刺激 Yellow Green、●：Orange、▲：Purple、◆：Achromatic。白抜ききのシンボルは同時呈示での値、下段(D)～(F)での折れ線は、4参照刺激に対する結果の平均値を示す。

(A)の楕円面積 $A$ では、ISIによって値の上下はあるが、変化に一貫した傾向は見られない。しかし、いずれも同時呈示(白抜きシンボル)の方が継時呈示(黒シンボル)に比べて低い値を示している。この継時比較での弁別能力の低

下は過去の他の研究者による報告と一致する。(B)は等色楕円体の輝度軸方向の径 $dY$ であるが、Yellow-Greenだけ値が高い。これは刺激輝度がそもそも高いため、楕円体中心の輝度値 $Y$ との比 $dY/Y$ で見れば他と変わらない。ここでも面積同様、ISIによる変化は見られない。しかし継時呈示と同時呈示の差は一貫していない。PurpleやAchromaticでは同時呈示の方が低く、逆にYellow-Greenでは高い値を示している。(C)の楕円体体積 $V$ においても、ISIによる値の上下はあるが一貫した変化は見られない。また、いずれも同時呈示の方が低い値になっている。どのグラフも参照刺激によって値にかなりばらつきがある。

そこで次に同時呈示で得られた値を基準にして相対的にプロットした。下段にそれを示す。縦軸は同時呈示条件の値( $A_s$ 、 $dY_s$ 、 $V_s$ 、添字sはsimultaneousの意)で割った相対値である。また体積、面積は次元を揃えるため、各々 $1/3$ 乗、 $1/2$ 乗とした。これらのグラフを見ると、相対値表示では参照刺激による差が小さくなるということが分かる。特に、(E)でその効果が大きい。(B)のYellow-Greenの100msec.で見られる落ち込みも(E)では目立たない。下段のグラフでは参照刺激による差が小さいので、平均値を求め、値を折れ線で結んだ。ただしシンボルは表示していない。(D)の楕円面積では全て1以上の値になった。これは先に述べた通り、同時呈示の方が楕円面積が小さいことを示している。継時呈示においてはISIによる影響は見られず、平均値は1.4付近でほぼ一定となっている。(E)では殆どの点が1付近に分布しており同時呈示と継時呈示で差がないことを示している。平均値も約1でISIに依らず一定である。(F)ではYellow-Greenの100msec.以外、1以上になっている。またISIに依らず一定(約1.3)の傾向を示している。

以上から、次のことが示される。楕円面積、つまり色度弁別に関しては同時呈示に比べて継時呈示での弁別能力は低い。しかし、継時呈示においてはISIの大小に依らず色度弁別能力は一定である。また、ISI 0msec.条件と同時呈示条件との差は、この弁別能力の低下が時間条件の違いによるのではなく、網膜周辺条件の違い(片方の刺激を観察しているときに、もう一方の刺激が呈示されているかどうかの違い)によるものであることを示している。 $dY$ の輝度弁別に関しては、同時と継時の差はない。また継時呈示においては、時間的ギャップ(ISI)の大小に関係なく、輝度色弁別能力は変わらない。

## 5.4 考察

### 5.4.1 等色中心位置に関して

同時呈示から継時呈示、さらに時間的ギャップ(ISI)の増大という変化に伴って、等色する点は僅かに彩度の低下する方向にずれる。この等色点のずれは、色記憶に関する過去の研究報告(Newhall, Burnham, and Clark 1957)とは逆の方向である。また、ずれの大きさもかなり小さい。記憶実験のように1

回の観察だけでは、記憶での色のずれが生じる可能性はある。しかし、今回のように自由に何回でも観察できる状況ではずれは起こりにくいと考えられる。

それでも僅かにずれが生じたということは、比較作業が等色刺激から参照刺激、参照刺激から等色刺激というように双方向的に行なわれていない可能性がある。もしそうだとすると、本実験とNewhall, Burnham, and Clark(1957)の結果を考え併せて、まず(1)等色刺激を観察し記憶する、次に(2)参照刺激を観察し記憶した色と比較する、そして(3)(2)で得た印象を基にして調色、という順序が優勢であると予想される。しかし、被験者1人だけの結果であり、これ以上の考察は本研究の主題から外れることになるので、等色点のずれに関してはまた機会をあらためて実験を設定し、検討することが必要である。

#### 5.4.2 等色の繰り返し精度に関して

等色の繰り返し精度として95%等色楕円体の体積 $V$ 、等輝度断面の楕円面積 $A$ 、輝度方向の径 $dY$ を求め、条件の違いによる影響を検討した。継時呈示条件においては等色楕円体の大きさに時間的ギャップ(ISI)の影響は見られなかった。しかし、楕円面積 $A$ や楕円体体積 $V$ では、同時呈示と比較して明らかな精度低下が観察された。輝度方向の径 $dY$ で差がでなかったのは、輝度弁別は継時呈示条件でも同時呈示条件と同程度の能力であることを示している。一方Uchikawa and Ikeda(1986)は継時比較での輝度弁別能力の低下を報告している。その実験では2刺激は二分視野として、空間的に隣接配置されている。しかし今回の実験ではすでに刺激間に $6^\circ$ の空間的ギャップがあり、この違いが結果に影響している可能性がある。また、この特性は被験者HSに特有であるとも考えられる。というのは、空間的ギャップの影響を調べた実験Iでも、 $dY$ の $6^\circ$ と $120^\circ$ の変化は他の被験者と比較して小さかったからである。

図5-7の(A)および(D)に示されるように、楕円面積 $A^{1/2}$ の結果において、同時呈示に比べて継時呈示での色弁別能力が低下していたことは過去の報告(Uchikawa and Ikeda 1981, Romero, Hita, and Jimenez del Barco 1986, Uchikawa and Ikeda 1986, Newhall, Burnham, and Clark 1957)と一致している。しかしISIの大小に関係なく一定という事実は、「刺激と刺激の時間間隔は色弁別能力に影響しない」ことを示している。継時呈示のISI 0msec.条件と同時呈示条件との物理的条件の違いは、網膜中心窩で片方の色刺激を観察しているときに、網膜周辺部に比較対象となるもう一方の色刺激が呈示されているかどうかだけである。従ってこの2条件間に見られた色弁別閾値の差は、「弁別能力に影響を与えるのは呈示の時間条件の違いではなく、網膜周辺部の条件の違いである」ことを示唆している。

#### 5.5 まとめ

刺激を継時呈示するときに、時間的ギャップ(ISI)を0から1000msec.の範囲で変化させ、等色の繰り返し精度を測定した。等色点のばらつきをxyY色空間内の楕円体で評価したところ、楕円体の大きさはISIによらず一定であった。しかし同時呈示と比べると明らかな増大が見られ、注視観察時の網膜周辺情報の重要性が示唆された。

## 第6章 総合考察

### 6.1 空間的に離れた刺激の色弁別における視点移動時間の影響

視点移動による時間的ギャップが、刺激が空間的に離れているときに見られる色弁別能低下の主要因ではないことは第5章で明らかになった。図6-1には被験者HSの空間的ギャップに対する楕円面積の変化を示すグラフ(図3-9)を視点移動時間 $\Delta T$ (図4-10の縦軸値)を横軸として再プロットし、時間的ギャップ効果のグラフ(図5-7(D))とあわせて表示した。空間的ギャップ効果を示す白抜きのシンボルは空間間隔 $6^\circ \sim 60^\circ$ の変化に対して、視点移動時間 $\Delta T$ は約100~600msec.の範囲で増大し、楕円面積は1から1.4付近まで上昇している。一方、空間間隔を $6^\circ$ に固定し、時間間隔だけを変化させたとき(黒シンボル)は1.4付近の値で殆ど変化していない。2つの曲線で横軸の値が等しい所では網膜中心窩に与える刺激の時間的条件は等しいはずである。違うのは注視時の網膜周辺に与えられる情報、つまりもう一方の刺激が呈示されているかどうかである。したがって、斜線部分が示す弁別能力の差は網膜周辺部の情報の差によるものと考えざるを得ない。つまり空間的に離して行ったときの $60^\circ$ までの上昇(白シンボル)は、視点移動による時間的ギャップではなく、周辺視の特性が現れていると考えられる。 $60^\circ$ 以上では視野から外れてしまうため、弁別能力はあまり変化しないのであろう。

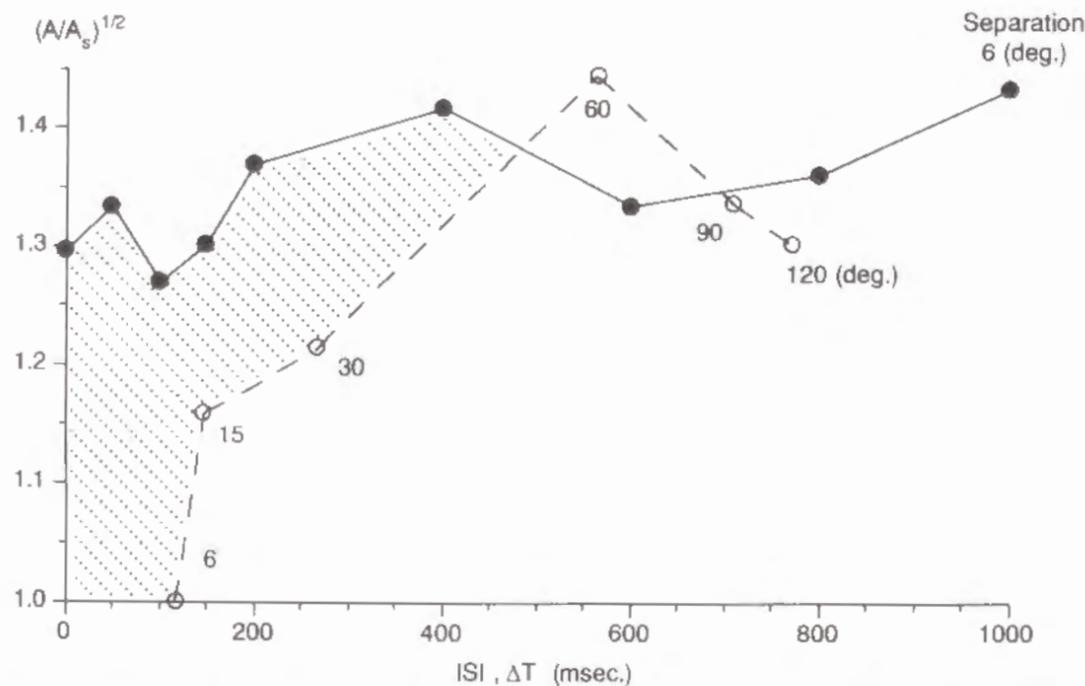


図6-1 図3-9と図4-10を基にして、空間的に離れた刺激配置での等色楕円面積 $(A/A_s)^{1/2}$ を視点移動時間 $(\Delta T)$ の関数として再描画(○)し、図5-7(D)の継時呈示での時間ギャップの関数 $(A/A_s)^{1/2}$ の平均値(●)と比較した。

### 6.2 空間的に離れた刺激の色弁別における周辺視野情報の影響

ここまでの考察から、空間的に離れた刺激の色弁別では、一方の刺激観察中のもう一方の刺激に関する周辺視野からの情報が重要であることが示された。はたしてその情報とは色情報、つまり周辺での色の見えなのだろうか。周辺視での色の見えに関して、数多くの研究(Moreland and Cruz 1958、Boynton, Schafer and Neun 1964、Abramov and Gordon 1977、Stabell and Stabell 1982、Uchikawa, Kaiser and Uchikawa 1982、関口・池田 1983、高瀬・阿山・池田 1991)があるが、いずれも周辺視での色み量の低下、つまり彩度の低下を報告している。これらはいずれも片眼による測定であるが、本研究のように両眼での観察においては片眼に比べて視野が広がるため、周辺でも大きな色の見えの劣化は起きていない、あるいは小さい可能性がある。そこで周辺視でのカラーネーミングを両眼で行い、空間的に離れた刺激呈示条件における等色作業での、周辺網膜からの色情報の有効性を検討した。

被験者はHS 1名。刺激呈示には本実験と同じ装置を用いた。ただし、色彩計の積分管の前面に、開口のあるマスクを設置し、 $0.1^\circ$ の固視点を呈示した。対象となる刺激を7種類用意した。Yellow Green、Orange、Purpleは実験1および実験5で用いた参照刺激である。Achromaticは実験5で、Yellow-Green(LS)、Orange(LS)、Purple(LS)は実験2および実験3で用いた刺激である。カラーネーミング終了時の測色値を表6-1に示す。被験者は固視点に対し正面を向き、それを固視した状態で、周辺に呈示される $2^\circ$ 正方形の参照刺激を観察し、カラーネーミングをする。観察は両眼で行なう。何回でも見ることができ、トロクスラー効果(固視を続けていると色が消えてゆく現象、Clarke 1960)を避けるため、1回の呈示時間は500msec.とした。参照刺激の呈示位置は固視点から左に $6^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ とした。また参照刺激を固視、つまり中心窩でのカラーネーミングも行なった。

表6-1 カラーネーミングに用いた参照刺激の測色値。

参照刺激	x	y	Y (cd/m <sup>2</sup> )
Yellow Green	0.396	0.543	179.0
Orange	0.616	0.355	39.7
Purple	0.380	0.212	46.2
Achromatic	0.396	0.401	51.1
Yellow-Green(LS)	0.529	0.378	42.2
Orange(LS)	0.362	0.501	59.9
Purple(LS)	0.361	0.292	46.1

カラーネーミングは、反対色応答に基づいて知覚量の成分比率を答える方法である (Hård and Sivik 1981, Gordon and Abramov 1988)。まず全体を10として白み成分、黒み成分を答える。次いで、赤、青、黄、緑の中から反対色にならないように2色以内を用いて色相を表現する。このときも全体を10として割合を回答する。例えば、黒み1、白み3(残りは色み6)、さらに赤7、黄3と答えたとき、黒成分は0.1、白み成分は0.3、赤成分は $0.6 \times 0.7 = 0.42$ 、黄成分は $0.6 \times 0.3 = 0.18$ となる。各刺激、各条件に対し、計5回のカラーネーミングを行なった。

(結果) いずれの場合も黒の回答は得られなかった。光源色モードの典型的な色応答である。5回の結果を平均し、図6-2に表示した。グラフは極座標表示で、中心からの距離は色み成分の大きさを、角度方向は色相を表わしている。中心窩の結果を大シンボルで表わし、 $6^\circ$ 、 $15^\circ$ ・・・と順に折れ線で結んだ。

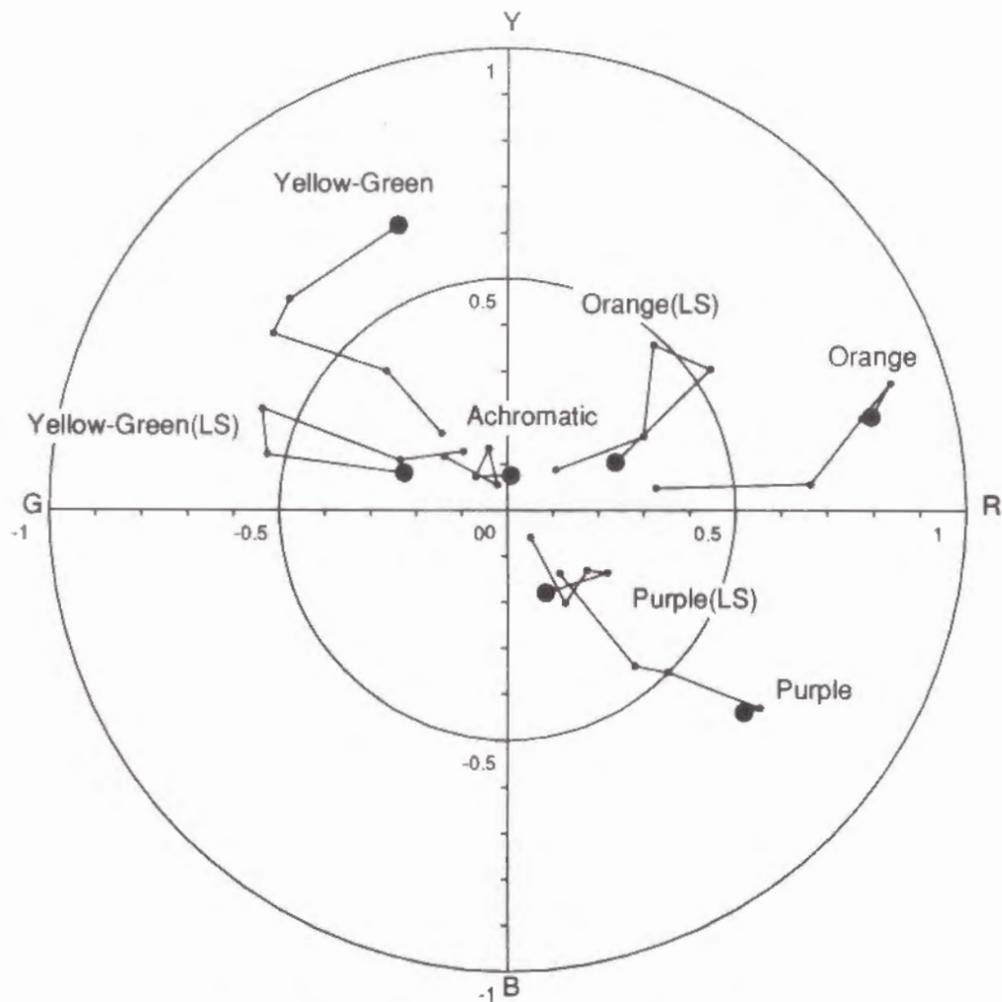


図6-2 周辺視でのカラーネーミングの結果。

中心からの距離で有彩色成分の量を、角度方向で色相を示す。大シンボルは中心窩での結果を示している。中心窩、周辺 $6^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ の順に折れ線で結んだ。

Achromatic以外は彩度の変化が見られる。Yellow-Green、Orange、Purpleといった高彩度の刺激では周辺に行くほど彩度が低下する傾向を示している。Yellow-Green(LS)、Orange(LS)、Purple(LS)といった低彩度の刺激ではいったん彩度が上昇してから低下する方向へ変化している。Purple、Purple(LS)以外では色相の変化も起きている。さらにOrangeやPurple、Achromaticを除いた刺激では、 $6^\circ$ ですでに大きく色見えが変化している。

微細な色の違いを見分けなければならない色弁別作業では、図6-2が示す周辺視での色見えの変化は致命的であり、網膜周辺から得た「色情報」を利用しているとは考えにくい。では色見え以外の網膜周辺情報の、いったい何が等色精度や色弁別に効いているのだろうか。この点を視覚情報処理の観点から考えてみよう。

視覚系の情報処理システムにおいて外界の事物が「何であるか」(what)を知るための物体認識に関わる機構と、その事物が「何処にあるか」(where)を知るための空間定位に関わる機構は別々に存在し並列的に働いている (Schneider 1969)。つまり個々の事物のwhere情報とwhat情報は視覚系の初期段階では別々に処理され、後に個々のwhere情報とwhat情報が統合され、最終的な外界の知覚を形成するのである。解剖学的にも、網膜から出た視神経の一部は外側膝状体 (Lateral geniculate nucleus, LGN) を経て視覚皮質のV1へと伸びている。これはいわゆるwhat情報の経路である。一方where情報の経路は、網膜視神経から上丘 (superior colliculus)、視床枕 (pulvinar) を経て視覚皮質のV4へと至る。また最近では、what情報の経路の中でもさらにwhatとwhere情報に分かれ、そのwhere情報はV1から上丘へと向かっていると言われている (Mishkin, Ungerleider, and Macko 1983)。

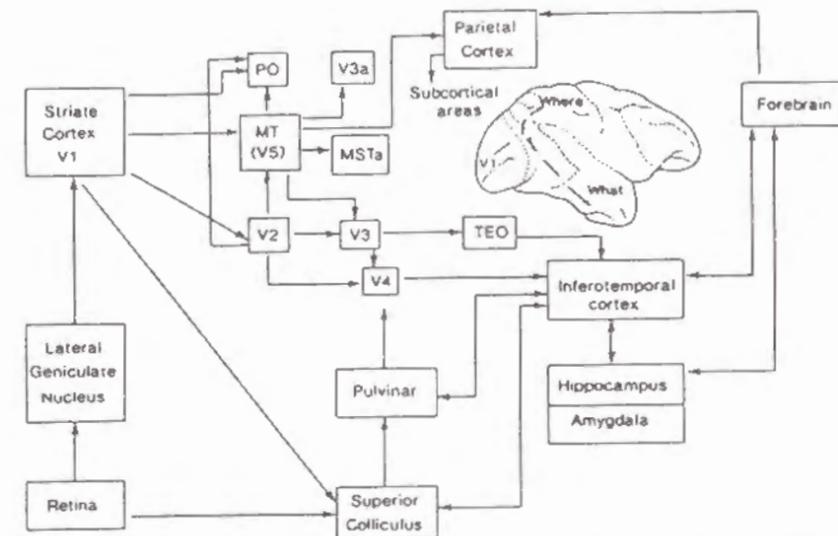


図6-3 視覚系におけるwhat情報とwhere情報の流れ。Davidoff(1991)から引用。

また物体認識やパターン認識に関わる機構はいわゆる網膜中心主義（池田1988）であり、周辺からの情報はあまり使われていない。これは先程のカラーネーミングの結果も示す通り、中心窩から外れると色の見えや視力が急激に悪くなることから分かる。解剖学的には視野の中心部分の情報処理に関与している部位が視覚皮質の大部分の面積を占めている。一方、*where*情報の経路である上丘においては中心窩の情報は、なんら特別な取り扱いを受けていない。

色弁別作業において、片方の刺激を注視しているときの網膜周辺はもう一方の刺激を捕らえている。このとき、周辺視野からの色や形などの*what*情報ではなく*where*情報、つまり空間定位情報が色弁別に重要な働きをしているのではないだろうか。2つの色刺激は記憶を介して比較される。したがって*where*情報は*what*情報である色の記憶に関与していると予想される。周辺視野からの空間定位情報により色記憶機構内に色情報の保管場所が確保される、あるいはより強固に固定されるのではないか。逆に*where*情報がないと色情報の保管場所が与えられないので記憶できない、あるいは記憶における劣化が激しくなると推測される（図6-4）。これらの問題は、視点移動を通してダイナミックになされる外界空間の知覚機構（Ishida and Ikeda 1989、石田・池田 1990、石田・篠田・池田 1993、石田・池田 1993）にも深く関わっており、今後の視覚・大脳研究による解明に期待がもたれるところである。

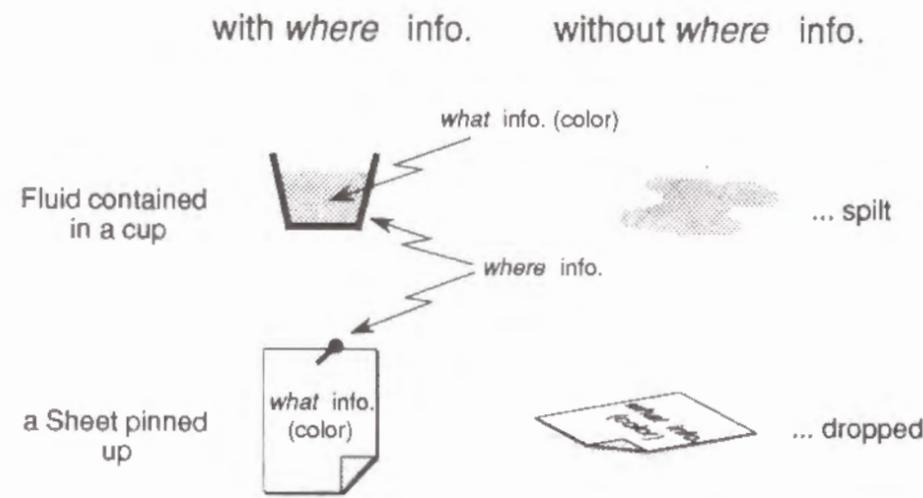


図6-4 色記憶における周辺視野からの*where*情報の働き。

### 6.3 刺激対の時空間的ギャップを考慮した色差式中の補正係数の提案

ここでは本研究で得られた結果および考察を基にして、刺激間の時空間ギャップの影響を考慮した色差式の補正係数を提案する。第3章で刺激間隔に対する等色精度は $6^\circ$  から $60^\circ$  の間で低下し、それ以降ではほぼ一定となる形状を示した。さらに表3-3に示したように、刺激間隔 $6^\circ$  と $120^\circ$  での $V^{1/2}$ の比の全被験者、全参照刺激に対する平均値は1.29であった。また第5章において、継時呈示では時間ギャップの大小によらず弁別能は一定であるが同時呈示に比べると劣っていた。なおかつその低下は同一視野に入らない位、空間的に離れているときの精度低下とほぼ等しい。したがって空間ギャップがあるときの色弁別能低下は視点移動による時間ギャップのためではなく、周辺視野からの情報の減少によることが示された。以上から次の補正係数を提案する。

大きさ $2^\circ$ 、光源色モードの刺激において、中心間隔 $6^\circ$  で離れている2刺激が同時に呈示されている条件を基準にしたとき（色差は $\Delta E^*$ ）、

2刺激が同一視野から外れる程（約 $60^\circ$  以上）離れている、あるいは継時的に呈示される場合の色差 $\Delta E^{**}$  は次式で与えられる。

$$\Delta E^{**} = \frac{\Delta E^*}{k_E} \quad , \quad \text{ただし } k_E = 1.3$$

2刺激がまったく隣接している状況からの補正に関しては、3.1.3の(iv)においてSharpe and Wyszecki(1976)の報告を参考に、約1/2倍の色弁別能低下と概算した。しかしWitt(1990)の報告では $0.5^\circ$  のギャップで既に1/2以下の弁別能低下が報告されている。また1.2.3で述べたように、CIE1-28でも $0.5^\circ$  以上のギャップ条件に対する補正係数 $k_E$ として1.6、2、2.6の3つの値を提案している。したがって隣接条件を基準としたときの、同一視野から外れる程（刺激間隔 $60^\circ$  以上）離れている状況の補正係数 $k_E$ は少なくとも2以上（ $\sim 1.6 \times 1.3$ ）、場合によっては3.4以上（ $\sim 2.6 \times 1.3$ ）と見積もられる。

標準化のためには、本実験で得られた結果を基にしてさらに被験者数や刺激の種類を増やし、データを収集することが必要である。

## 6.4 色弁別メカニズム

### 6.4.1 色知覚機構と色比較機構

実験2の低輝度での等色において、精度は大きく低下 ( $A^{1/2}$ で3.5~4倍、図3-13参照) しているにも拘らず、作業にそれほどの苦痛は伴わないという内観報告が得られた。一方、実験1の刺激の間隔を大きくしていったときの等色では、作業自体の難易度に比べて等色精度の低下は小さい ( $A^{1/2}$ で1.37倍、表3-3参照)。この2つの事実は、色弁別作業に対する難易度の印象が、単純に色弁別能力の程度を表していないことを示している。それはなぜだろうか。

刺激間隔と刺激輝度の条件変化の等色精度に与える影響が独立であった(実験2)ことから考えても、微小視野(Brown 1952、Bedford and Wyszecki 1958)、あるいは低輝度(Brown 1951)で見られる色弁別能力の低下と、空間ギャップや時間ギャップを伴った呈示法での色弁別能力の低下では、その原因が本質的に異なるのが妥当である。前者では網膜レベルの色知覚機構が刺激呈示条件の影響を受けている。そのため色の見え(色知覚)自体が曖昧になっており、被験者は“同じ”に見える(これ以上は違いが分からない)と感じて等色を終了する。このときの等色作業に対するストレスは少ない。それに対し時間ギャップのある刺激呈示での色弁別作業では、個々の刺激に対する色の見え(色知覚)自体は明瞭であるにも拘らず、両者を比較する作業が思うように出来ない(色比較機構の障害)のである。このときの被験者は“同じ”か“異なる”かの判断に対しても自信がもてない。明瞭な色の見えを色比較作業に活かすことのできないというジレンマが大きな精神的ストレスをもたらすのであろう。

### 6.4.2 比較レベルに依存する色弁別能力

時空間ギャップのある刺激呈示での弁別能力低下のように、比較作業の障害による色弁別能力低下の原因に関して、次のような色弁別メカニズムを想定した。

----色弁別(色比較)は視覚系内の様々なレベルで行なわれ、そのレベルによって弁別能力が決まる。また、どのレベルで遂行されるかは、刺激の呈示条件によって流動的に決定される ----

同時呈示で、空間的にも隣接している場合のように最良の条件では、境界部分から色差を直接知覚できる。このときの弁別能力は最も高く、仮にこれを“知覚レベル”での色弁別と呼ぶ。ところが条件が悪くなる、つまり空間的にギャップが入ったり継時呈示になると、記憶に頼る必要が生じる。すなわち、色差を直接知覚できないため、知覚している色と記憶している色の比較から差

を引き出さなければならず、弁別能力は低下する。その延長線上にあるのが長期記憶による色弁別であり、これを“長期記憶レベル”での色弁別と呼ぶことにする。この場合は第1章の1.2.2で述べたように、長期的に色情報を保持するために言語(色名)を利用しており、カテゴリカルな特徴が現れる。

2刺激の間に時空間的なギャップが存在している条件での色弁別では明らかに記憶を介しての比較が行われていると考えられる。記憶にもいくつかの段階(種類)があり、現時点では感覚記憶(sensory memory)、短期記憶(short-term visual memory)、長期記憶(long-term visual memory)と大きく3段階に区別されている。当然、感覚記憶よりも短期記憶、短期記憶よりも長期記憶の方が記憶精度は低い。また、どの記憶メカニズムが機能するかは、時間条件をはじめとする様々な条件に依存して決定される(Avons and Daley 1990)と考えられている。6.2において周辺空間定位情報つまりwhere情報の色記憶への関与について考察したが、周辺視野からのwhere情報の欠落によって、あるレベルでの記憶メカニズムが不能になり、次の記憶メカニズムへと移行する(ただしこのときのレベル変化は上の3段階よりもっと細かい)。その結果、色弁別能力が低下したのではないだろうか。この比較レベルの移行は実験4で観察された視覚系のストラテジーの変化からも推測されることである。それに対し、視点移動による時間的ギャップの大小はレベルの決定にあまり影響しない、したがって等色精度にも変化が現れなかったと考えられる。

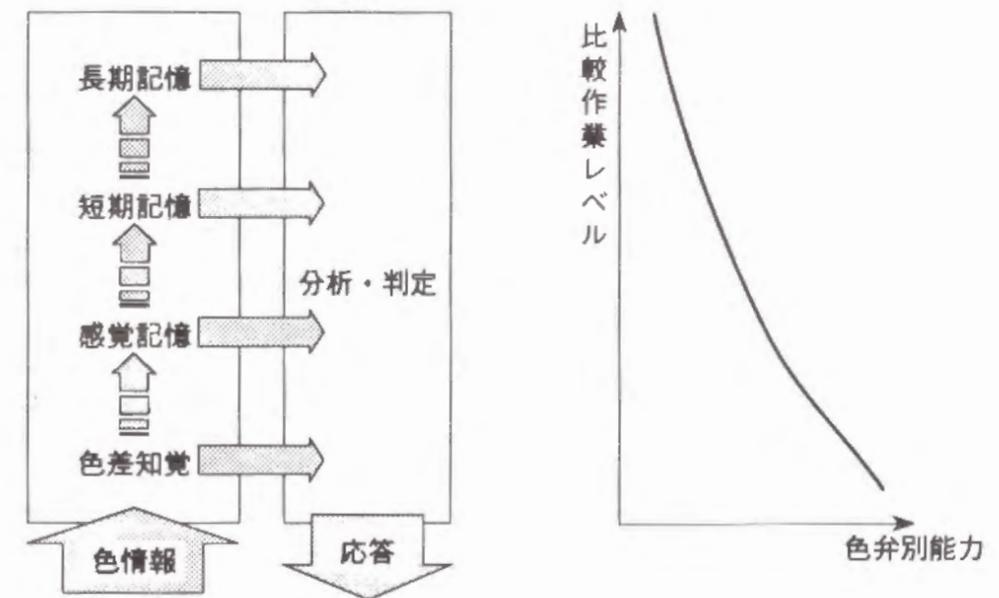


図6-5 色比較レベルと色弁別能力。

## 6.5 本研究の応用

本研究の応用的意義は「状況に応じてどの位の精度で色を扱ったらよいかの情報を提供し、色管理および色再現技術を支援する」ことにある。つまり状況に応じて色精度や許容範囲を変化させ、効率的な色の取り扱いを実現することである。その観点から本研究の応用を述べる。

建築視環境の色彩を扱う際には、じつに多様な観察条件を想定しなければならない。例えば、複数の同一色のタイルで、一つの壁を構成するときのように、隣接して配置される材料の色に対しては、厳密な色の管理が必要になるであろう。製造ロットによる色の違いなどは許されない。しかし、異なる棟の建物の壁の色を統一する場合のように、空間的に離れて配置される物に対しては多少の色の違いも許容される。特に本研究から、同時に比較できない（同一視野に収まらない）ほど離れている場合は隣接条件に比べて2倍以上の許容範囲を設定してよいと言える。色彩計画や色指定の段階から、使われる場所や配置を考慮して適切に「色の許容範囲」を設定しておけば、建築材料の製造段階あるいは仕上げ工程で、色合わせのためにかかるコストや時間、労力を削減することができる。

CGによる建築物や景観、照明のシミュレーションが盛んである。最近では様々な技術を駆使してより臨場感のあるプレゼンテーションが行われている。中でも人工現実感技術（virtual reality, VR）の登場により、臨場感は飛躍的に向上した。VRでは頭部搭載ディスプレイ（Helmet Mounted Display, HMD）によって、非常に大きな視野の立体画像を呈示し、観察者の視線や体の向きに応じて画面を変更してゆく。画面の大きさ（画素数）や色精度（1画素当たりのビット数）はカラー画像のデジタルデータ容量や計算量に直接影響する。したがって、ここでも視力や色弁別能力等の視覚特性を積極的に利用して解像度や色精度を設定することが役に立つ。すなわち色精度に関して言えば、背景や画像周辺部分の色精度を落とす（具体的には1画素当たりのビット数を下げる）ことによりハードの負担を軽減し、結果として表現能力（描画速度）を向上させることができるであろう。同様に、画像データベースにおけるデータ容量の軽量化にも適用可能と考えられる。

## 6.6 おわりに

今後様々な環境において色差を扱うためには、さらに多様な刺激呈示条件で色弁別能力を測定し、色差式や均等色空間に反映させてゆくことが要求される。その際、やみくもに測定するのではなく、物理条件の変化が色弁別メカニズムの何に、つまり「色の見え」自体を曖昧にしているのか「比較作業」を阻害しているのかを考慮しておくことが重要なのではないだろうか。とくにCIEのTC1-28では刺激条件と色弁別能力の関係を一元的に扱っていたが、これからは「色知覚メカニズム」に影響する要因と「比較メカニズム」に影響する要因、というように区別して扱うことを提案する。

第4章の等色作業中の視点の動きの解析結果は我々に重要な示唆を与えてくれる。人間は環境変化に応じて臨機応変に観察方法を変えろということである。色弁別作業では刺激間隔が狭いときは注視時間も短く頻繁に見比べているが、間隔が離れると1回の注視に時間をかけてゆっくりと比較している。これは視覚系のストラテジーの切り替えの現れであるが、他の視覚作業においても環境変化によってストラテジーの変化が起きると予想される。観察条件を制限した実験で得られたデータからだけでは日常行動での視知覚を予測しきれないことを意味している。したがって、豊富な視覚の基礎データを多様な視環境に活用しようとするなら（1）環境変化による観察行動の変化の把握、（2）その観察条件での視覚データの適用、という2段階構えで臨む必要がある。

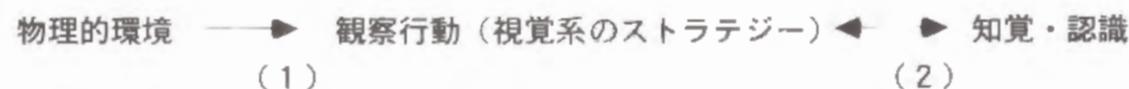


図6-6 視覚系のストラテジーと視知覚

## 第7章 結論

本研究で得られた結論を以下に述べる。

- ・刺激間隔を $6^{\circ}$ ～ $120^{\circ}$ で変化させたときの等色点のばらつきをバーンハムタイプの色彩計を用いて測定した。ばらつきを楕円体で近似し、体積、等輝度断面の楕円面積、輝度方向の厚みを比較した。体積、等輝度断面面積、輝度軸方向の厚みは間隔の増大に伴って僅かに大きくなっていったが、変化は単調ではなく $60^{\circ}$ 付近を境に傾きが変化していた。 $120^{\circ}$ での等色精度は $6^{\circ}$ に対して、色度図上で1.37倍、輝度軸方向に1.17倍低下していた。
- ・低輝度刺激における、刺激間隔変化に対する等色の繰り返し精度変化を測定した。低輝度においては輝度弁別能の低下は見られなかったが、xy色度平面での等色楕円は1次元方向で約3.5～4倍の大きさになり、色度弁別能力の著しい低下が観察された。また楕円長軸も第三色覚異常の混同色線の変化した。しかし刺激間隔に対する相対的な変化は低輝度でも変わらず、刺激間隔と刺激輝度の条件変化は、視覚系の色弁別メカニズムに対して独立に影響していることを示した。
- ・時間制限が与えられた状況での、等色精度に対する刺激間隔の影響を検討した。時間制限下では等色精度は大きく低下していたが、等色精度に与える刺激間隔の影響は時間制限下でも変わらない。刺激間隔が $6^{\circ}$ から $120^{\circ}$ へ広がったときの精度低下は1.2から1.3倍程度であった。
- ・空間的に離れた刺激を等色しているときの観察方法を探るために、刺激間隔を変えて等色作業中の視点の動きを測定した。等色が完了するまでの時間は刺激間隔が広がってもほぼ一定、しかし観察回数は減少し、1回の観察にかける時間は増大していた。これは視覚系の戦略変化を示している。頭部の回転は被験者HSでは $30^{\circ}$ 以上、被験者TIで $15^{\circ}$ 以上の刺激間隔において起きていた。視点移動に要する時間は間隔に伴って増大していたが、他の視覚作業に比べて値が大きく、比較的ゆっくりと視点移動していることが分かった。また、刺激間隔の増大に対して飽和してゆく非線形の形状を示した。
- ・刺激を継時呈示するときに時間的ギャップ (ISI) を0から1000msec.の範囲で変化させ、等色の繰り返し精度を測定した。等色点のばらつきをxyY色空間内の楕円体で評価したところ、楕円体の大きさはISIによらず一定であった。しかし同時呈示と比べると明らかな増大が見られた。これにより、空間的に離れた刺激条件での等色精度は、視点移動による時間的ギャップよりも、注視観察時の網膜周辺情報に大きく依存していることが示唆された。

- ・周辺視でのカラーネーミングを両眼で行い、空間的に離れた刺激呈示条件での等色作業における周辺網膜からの色情報の有効性を検討した。結果は周辺視での色の見えの大きな劣化を示した。それにより周辺からの色情報ではなく、空間定位に関する情報が色比較 (色記憶) に効いているとの推測に至った。
- ・CIE TC1 28、1-29の方式に則って、刺激対の時空間的ギャップを考慮した色差式中の補正係数を提案した。これについては標準化に向けて、今後更なるデータの収集が必要であることを述べた。

[ 本研究に関連する発表論文 ]

Uchikawa, K. and Shinoda, H.: Effect of color memory on color appearance, Proceedings of the Symposium of the International Research Group on Color Vision Deficiencies, pp. 35-43 (1990)

石田泰一郎、篠田博之、池田光男: 跳躍眼球運動時の等輝度刺激の変位検出閾, 光学, 22, pp. 27-32 (1993)

内川恵二、栗木一郎、篠田博之: 開口色と表面色モードにおける色空間のカテゴリカル色名領域, 照明学会誌, 77-6, pp. 346-354 (1993)

Shinoda, H., Uchikawa, K. and Ikeda, M.: Categorized color space on CRT in the aperture and surface color mode, Color Research and Application, 18-5, pp. 326-333 (1993)

篠田博之、池田光男: 大きな視点移動を伴う等色作業における繰り返し精度, 照明学会誌, 78-2, pp. 76-82 (1994)

内川恵二、栗木一郎、篠田博之: カテゴリー比率評価法による開口色と表面色モードの色の見えの表現, 照明学会誌, 78-2, pp. 83-93 (1994)

篠田博之、池田光男: 等色作業中の視点の動き, 照明学会誌, 78-10, pp. 545-54 (1994)

篠田博之、池田光男: 継時呈示における等色繰り返し精度に対する時間ギャップの影響, 照明学会誌, 78-10, pp. 560-567 (1994)

[ 本研究に関する口頭発表 ]

篠田博之、内川恵二: 表面色と開口色モードでのカテゴリカル色知覚、第51回応用物理学会 (1990)

篠田博之、内川恵二: 表面色と開口色モードでの色名による色空間の領域分割、第22回日本色彩学会全国大会 (1991)

篠田博之、池田光男: カラーマッチングにおける2刺激間距離の影響、光学連合シンポジウム京都'92 (1992)

篠田博之、池田光男: 空間的に離れた刺激の等色、第24回日本色彩学会全国大会 (1993)

篠田博之、池田光男: 等色の繰り返し精度における2刺激の間隔の影響、光学連合シンポジウム旭川'93 (1993)

謝辞

本研究を終えるにあたり、東京工業大学での修士課程から今まで、長きに渡ってご指導いただきました京都大学工学部教授・池田光男先生に心から感謝の意を捧げます。池田先生には心理物理学の基礎から建築視環境での応用に至るまで幅広く御教授賜り、この6年間で研究の本質を学ばせていただきました。

京都大学工学部助手・石田泰一郎博士に心から感謝の意を表します。石田博士には研究上の諸問題に対して実際的な御指導を賜りました。

東京工業大学 教授・内川恵二博士には修士課程において、視覚研究全般についての御教授と色カテゴリー研究での御指導を賜りました。深く感謝の意を表します。

京都大学名誉教授・寺井俊夫博士には、著者の本学博士課程入学に際し御尽力いただきました。この場を借りて心より御礼申し上げます。

通産省工業技術院生命工学工業技術研究所・佐川賢博士、広島市立大学助教授・中野靖久博士には装置製作上、ご助言賜りましたこと心より感謝いたします。

京都大学池田研究室の皆さまならびに祖父江貴子さまには、実験の補助から被験者、ゼミでの議論など、種々御援助いただきました。心より御礼申し上げます。

東京工業大学池田研究室の卒業生ならびに内川研究室の皆さま、学会、シンポジウム等での活発な議論を通して有益なご助言を頂きましたこと、ここに御礼申し上げます。

本研究は日本学術振興会特別研究員制度、科学研究費補助金の援助を受けて行なわれました。

参考文献

- Abramov, I. and Gordon, J.: Color vision in the peripheral retina. II. Hue and saturation, *Journal of the Optical Society of America*, 67, pp.202-207 (1977)
- Alman, D. H.: CIE technical committee 1 29, industrial color-difference evaluation, *Color Research and Application*, 16-3, pp.219-220 (1991)
- Avons, S. E. and Daley, S. A.: Serial position curves for colored light patches, *Color Research and Application*, 15-5, pp.291-296 (1990)
- Balinkin, I. A.: Industrial color tolerances, *The American Journal of Psychology*, 52, pp.428-448 (1939)
- Bedford, R. E. and Wyszecki, G. W.: Wavelength discrimination for point sources, *Journal of the Optical Society of America*, 48-2, pp.129-135 (1958)
- Berlin, B. and Kay, P.: *Basic Colour Terms, their universality and evolution*, University of California Press, Berkeley (1969)
- Boynton, R. M., Schafer, W. and Neun, M. E.: Hue-wavelength relation measured by color-naming method for three retinal locations, *Science*, 146, pp.666-668 (1964)
- Boynton, R. M., Hayhoe, M. M. and MacLeod, D. I. A.: The gap effect: chromatic and achromatic visual discrimination as affected by field separation, *Optica Acta*, 24-2, pp.159-177 (1977)
- Breckenridge, F. C. and Schaub, W. R.: Rectangular uniform-chromaticity-scale coordinates, *Journal of the Optical Society of America*, 29, pp.370-380 (1939)
- Brown, W. R. J. and MacAdam, D. L.: Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences, *Journal of the Optical Society of America*, 39-10, pp.808-835 (1949)
- Brown, W. R. J.: The influence of luminance level on visual sensitivity to color differences, *Journal of the Optical Society of America*, 41-10, pp.684-688 (1951).
- Brown, W. R. J.: The effect of field size and chromatic surroundings on color discrimination, *Journal of the Optical Society of America*, 42-11, pp.837-844 (1952)
- Brown, W. R. J.: Color discrimination of twelve observers, *Journal of the Optical Society of America*, 47-2, pp.137-143 (1957).

- Burnham, R. W.: A colorimeter for research in color perception, *The American Journal of Psychology*, 65, pp.603-608 (1952).
- Clarke, F. J. J.: A study of Troxler's effect, *Optica Acta*, 7, p.219 (1960)
- Clarke, F. J. J., McDonald, R. and Rigg, B.: Modification to the JPC79 colour-difference formula, *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 100, pp.128-132 (1984)
- Connors, M. M.: Effect of surround and stimulus luminance on the discrimination of hue, *Journal of the Optical Society of America*, 54-5, pp.693-695 (1964).
- Davidoff, J. B.: *Cognition through color*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts (1991)
- Farnsworth, D.: The Farnsworth rectilinear uniform chromaticity scale diagram No. 38, Memorandum Rep. 44-1, Med. Res. Lab. U.S. Submarine Base, New London, Conn. (1944)
- Gordon, J. and Abramov, I.: Scaling procedures for specifying color appearance, *Color Research and Application*, 13-3, pp.146-152 (1988)
- Hård, A. and Sivik, L.: NCS Natural color system: A Swedish standard for color notation, *Color Research and Application*, 6, pp.129-138 (1981)
- Hunter, R. S.: Photometric tristimulus colorimetry from Symposium on Color-Its specification and use in evaluating the appearance of materials, Philadelphia, American Society for Testing Materials (1941)
- 池田光男: *眼は何を見ているか*, 平凡社, 東京 (1988)
- 池田光男: *色彩工学の基礎*, 朝倉出版, 東京 (1980)
- Indow, T., Robertson, A. R., von Grunau, M. and Fielder, G. H.: Discrimination ellipsoids of aperture and simulated surface colors by matching and paired comparison, *Color Research and Application*, 17-1, pp.6-23 (1992)
- Ishida, T. and Ikeda, M.: Temporal properties of information extraction in reading studied by a text-mask replacement technique, *Journal of the Optical Society of America A*, 6, pp.1624-1632 (1989)
- 石田泰一郎、池田光男: サッケード前後の視野統合可能変位量, *光学*, 19, pp.673-681 (1990)

- 石田泰一郎、篠田博之、池田光男：跳躍眼球運動時の等輝度刺激の変位検出閾、光学、22, pp.27-32 (1993)
- 石田泰一郎、池田光男：跳躍眼球運動時の視野統合過程における位置情報の許容度、光学、22, pp.610-617 (1993)
- Jay, Jr., S. L., : Color control for the leather industry - The use of the CMC color difference equation for pass-fail decision-making, Journal of the American Leather Chemists' Association, 86, pp.353-363 (1991)
- Judd, D. B. : A maxwell triangle yeilding uniform chromaticities scales, Journal of the Optical Society of America, 25, pp.24-35 (1935)
- Judd, D. B. : Specification of color tolerances at the National Bureau of Standards, The American Journal of Psychology, 52, pp.418-428 (1939)
- 小松原仁：色差式の開発動向, 照明学会誌, 76-9, pp.496-499 (1992)
- Land, M. F. : Predictable eye-head coordination during driving, Nature, 359, pp.318-320 (1992)
- MacAdam, D. L. : Projective transformations of I. C. I. color specifications, Journal of the Optical Society of America, 27, pp.294-299 (1937)
- MacAdam, D. L. : Visual sensitivities to color defferences in daylight, Journal of the Optical Society of America, 32, pp.247-274 (1942)
- Middleton, W. E. K. and Mayo, E. G. : The appearance of colors in twilight, Journal of the Optical Society of America, 42-2, pp.116-121 (1952)
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., and Macko, K. A. : Object vision and spatial vision: Two cortical pathways, Trends in the Neurosciences, 6, pp.414-417 (1983).
- Morasso, P., Bizzi, E. and Dichgans, J. : Adjustment of saccade characteristics during head movements, Experimental Brain Research, 16, pp.492-500 (1973)
- Moreland, J. D. and Cruz, A. C. : Colour perception with the peripheral retina, Optica Acta, 6, pp.117-151 (1958)
- Newhall, S. M., Burnham, R. W. and Clark, J. R. : Comparison of successive with simultaneous color matching, Journal of the Optical Society of America, 47-1, pp.43-56 (1957)

- Nickerson, D. *et al.* : Color tolerance specification, Journal of the Optical Society of America, 34, pp.550- (1944).
- Park, J and Thompson, T. M. : Single number shade passing in yarn package dyeing, Journal of the Society of Dyers and Colourists, 97, pp.523-525 (1981)
- Pattee, H. E., Giesbrecht, F. G. and Young, C. T. : Comparison of peanut butter color determination by CIELAB L\*a\*b\* and Hunter color-difference methods and relationship of roasted peanut flavor response, Journal of Agricultural and Food Chemistry, 39-3, pp.519-523 (1991)
- Rayner, K. and McConkie, G. W. : What guides a reader's eye movements?, Vision Research, 16, pp.829-837 (1976)
- Robertson, A. R. : The CIE 1976 Color-difference formulae, Color Research and Application, 2-1, pp.7-11 (1977)
- Romero, J., Hita, E. and Jimenez del Barco, L. : A comparative study of successive and simultaneous methods in colour discrimination, Vision Research, 26-3, pp.471-476 (1986)
- Sanders, A. F. : Some aspects of the selective process in the functional visual field, Ergonomics, 13-1, pp.101-117 (1970)
- Schneider, G. E. : Two visual systems: Brain mechanisms for localization and discrimination are dissociated by tectal and cortical lesions, Science, 163, pp.895-902 (1969).
- 関口修利、池田光男：色の見えに基づく色視野の測定, 日本眼光学会誌, 4, pp.122-127 (1983)
- Sharpe, L. T. and Wyszecki, G. : Proximity factor in color difference evaluations, Journal of the Optical Society of America, 66 1, pp.40-49 (1976).
- Shinoda, H., Uchikawa, K. and Ikeda, M. : Categorized color space on CRT in the aperture and surface color mode, Color Research and Application, 18-5, pp.326-333 (1993)
- 篠田博之、池田光男：大きな視点移動を伴う等色作業における繰り返し精度, 照明学会誌, 78-2, pp.76-82 (1994)
- 篠田博之、池田光男：等色作業中の視点の動き, 照明学会誌, 78-10, pp.545-554 (1994)
- 篠田博之、池田光男：継時呈示における等色繰り返し精度に対する時間ギャップの影響, 照明学会誌, 78-10, pp.560-567 (1994)

Stabell, U. and Stabell, B. : Color vision in the peripheral retina under photopic conditions, *Vision Research*, 22, pp.839-844 (1982)

杉山芳雄、福田保: MacAdam ellipseとMunsell scaleによるUCSの相互比較, *応用物理*, 28, pp.157-164 (1959)

高瀬正典、阿山みよし、池田光男: 周辺網膜における色度図全域にわたる色光の色の見えの変化, *光学*, 20-7, pp.420-429 (1991)

Traub, A. C. and Balinkin, I. : Proximity factor in the Judd color difference formula, *Journal of the Optical Society of America*, 51-7, pp.755-760 (1961).

Uchikawa, H., Kaiser, P. K. and Uchikawa, K. : Color-discrimination perimetry, *Color Research and Application*, 7-3, pp.264-272 (1982)

Uchikawa, K. and Ikeda, M. : Temporal deterioration of wavelength discrimination with successive comparison method, *Vision Research*, 21, pp.591-595 (1981)

Uchikawa, K. and Ikeda, M. : Accuracy of memory for brightness of colored lights measured with successive comparison method, *Journal of the Optical Society of America*, A, 3-1, pp.34-39 (1986)

Uchikawa, K. and Shinoda, H. : Effect of color memory on color appearance, *Proceedings of the Symposium of the International Research Group on Color Vision Deficiencies*, pp.35-43 (1990)

内川恵二、栗木一郎、篠田博之: カテゴリー比率評価法による開口色と表面色モードの色の見えの表現, *照明学会誌*, 78-2, pp.83-93 (1994)

内川恵二、栗木一郎、篠田博之: 開口色と表面色モードにおける色空間のカテゴリカル色名領域, *照明学会誌*, 77-6, pp.346-354 (1993)

Witt, K. : Parametric effects on surface color-difference evaluation at threshold, *Color Research and Application*, 15-4, pp.189-199 (1990)

Witt, K. : CIE technical committee 1-28 parameters affecting colour-difference evaluation, *Color Research and Application*, 17-2, p.145 (1992)

Wyszecki, G. : Propagation of errors in colometric transformations, *Journal of the Optical Society of America*, 49-4, pp.389-393 (1959).

Wyszecki, G. and Fielder, G. H. : New color-matching ellipses, *Journal of the Optical Society of America*, 61-9, pp.1135-1152 (1971)

Wyszecki, G. and Stiles, W. S. : *Color Science*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York (1982)

Zangemeister, W. H. and Stark, L. : Types of gaze movement: Variable interactions of eye and head movements, *Experimental Neurology*, 77, pp.563-577 (1982)

## 付録

付録 1 : 色彩計の目盛 $W$ の値に対する 各原刺激の三刺激値または色度と輝度.....	A- 1
付録 2 : 参照刺激の分光透過率(%).....	A- 3
付録 3 : 実験 1 での等色点と等色楕円体.....	A- 6
付録 4 : 実験 4 で得られた眼球 $E$ 、頭部 $H$ 、視点 $G$ の動き.....	A-12
付録 5 : 実験 4 で得られた眼球回転速度 $V_E$ 、 頭部回転速度 $V_H$ 、視点移動速度 $V_G$ .....	A-18

付録1：バーンハム色彩計の目盛Wの値に対する各原刺激の三刺激値 ( $X_r, Y_r, Z_r, X_g, Y_g, Z_g \dots$ )、または色度と輝度 ( $x_r, y_r, Y_r, x_g, y_g, Y_g \dots$ ) の関係式。

(I)

測定日：1993/1/14、16

測定方法：W25目盛り間隔、日を変えて各2回測定

適用した実験：実験1

回帰式：

$$\begin{aligned} x_r &= 0.676 + 1.436 \times 10^{-6} W + 2.212 \times 10^{-9} W^2 \\ y_r &= 0.323 - 1.021 \times 10^{-6} W - 1.786 \times 10^{-9} W^2 \\ \log Y_r &= \log 1079.3 + 1.242 \times 10^{-3} W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_g &= 0.350 + 1.499 \times 10^{-5} W + 9.776 \times 10^{-9} W^2 \\ y_g &= 0.633 - 1.165 \times 10^{-5} W - 7.452 \times 10^{-9} W^2 \\ \log Y_g &= \log 1560.2 + 1.257 \times 10^{-3} W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_p &= 0.252 + 3.971 \times 10^{-5} W + 2.415 \times 10^{-8} W^2 \\ y_p &= 0.116 + 2.812 \times 10^{-5} W + 1.681 \times 10^{-8} W^2 \\ \log Y_p &= \log 50.02 + 1.273 \times 10^{-3} W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_b &= 0.209 + 2.447 \times 10^{-5} W + 1.581 \times 10^{-8} W^2 \\ y_b &= 0.132 + 3.308 \times 10^{-5} W + 2.194 \times 10^{-8} W^2 \\ \log Y_b &= \log 54.332 + 1.265 \times 10^{-3} W \end{aligned}$$

(A-1)

(II)

測定日：1993/7/28

測定方法：W100目盛り間隔、HとVのノブの停止方向を変えて4回測定

適用した実験：実験2

回帰式：

$$\begin{aligned} \log X_r &= 3.414 + 1.246 \times 10^{-3} W \\ \log Y_r &= 3.101 + 1.251 \times 10^{-3} W \\ \log Z_r &= 0.904 + 1.234 \times 10^{-3} W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log X_g &= 3.022 + 1.255 \times 10^{-3} W \\ \log Y_g &= 3.298 + 1.261 \times 10^{-3} W \\ \log Z_g &= 1.743 + 1.252 \times 10^{-3} W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log X_p &= 2.113 + 1.274 \times 10^{-3} W \\ \log Y_p &= 1.765 + 1.288 \times 10^{-3} W \\ \log Z_p &= 2.587 + 1.247 \times 10^{-3} W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \log X_b &= 2.068 + 1.275 \times 10^{-3} W \\ \log Y_b &= 1.902 + 1.296 \times 10^{-3} W \\ \log Z_b &= 2.576 + 1.252 \times 10^{-3} W \end{aligned}$$

(A-2)

(III)

測定日：1993/8/10

測定方法：W100目盛り間隔、HとVのノブの停止方向を変えて4回測定

適用した実験：実験3

回帰式：

$$\log X_r = 3.418 + 1.236 \times 10^{-3} W$$

$$\log Y_r = 3.104 + 1.241 \times 10^{-3} W$$

$$\log Z_r = 0.973 + 1.286 \times 10^{-3} W$$

$$\log X_g = 3.031 + 1.256 \times 10^{-3} W$$

$$\log Y_g = 3.307 + 1.264 \times 10^{-3} W$$

$$\log Z_g = 1.763 + 1.268 \times 10^{-3} W$$

$$\log X_p = 2.123 + 1.277 \times 10^{-3} W$$

$$\log Y_p = 1.773 + 1.291 \times 10^{-3} W$$

$$\log Z_p = 2.605 + 1.252 \times 10^{-3} W$$

$$\log X_b = 2.108 + 1.284 \times 10^{-3} W$$

$$\log Y_b = 1.933 + 1.305 \times 10^{-3} W$$

$$\log Z_b = 2.626 + 1.265 \times 10^{-3} W$$

(A-3)

(IV)

測定日：1993/11/25

測定方法：W100目盛り間隔、HとVのノブの停止方向を変えて4回測定

適用した実験：実験4、5

回帰式：

$$\log X_r = 3.373 + 1.230 \times 10^{-3} W$$

$$\log Y_r = 3.055 + 1.235 \times 10^{-3} W$$

$$\log Z_r = 0.947 + 1.303 \times 10^{-3} W$$

$$\log X_g = 2.969 + 1.253 \times 10^{-3} W$$

$$\log Y_g = 3.245 + 1.259 \times 10^{-3} W$$

$$\log Z_g = 1.710 + 1.272 \times 10^{-3} W$$

$$\log X_p = 2.046 + 1.285 \times 10^{-3} W$$

$$\log Y_p = 1.693 + 1.298 \times 10^{-3} W$$

$$\log Z_p = 2.526 + 1.261 \times 10^{-3} W$$

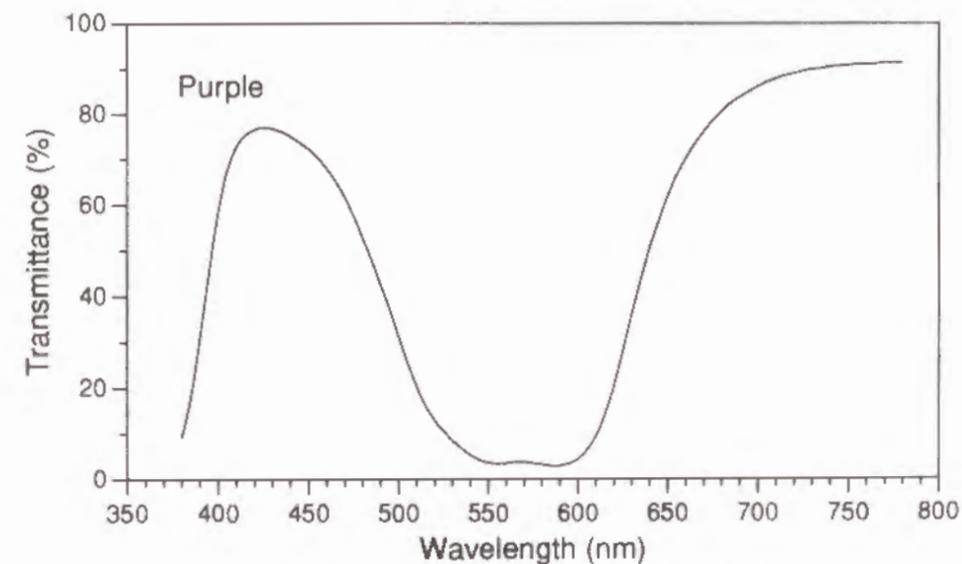
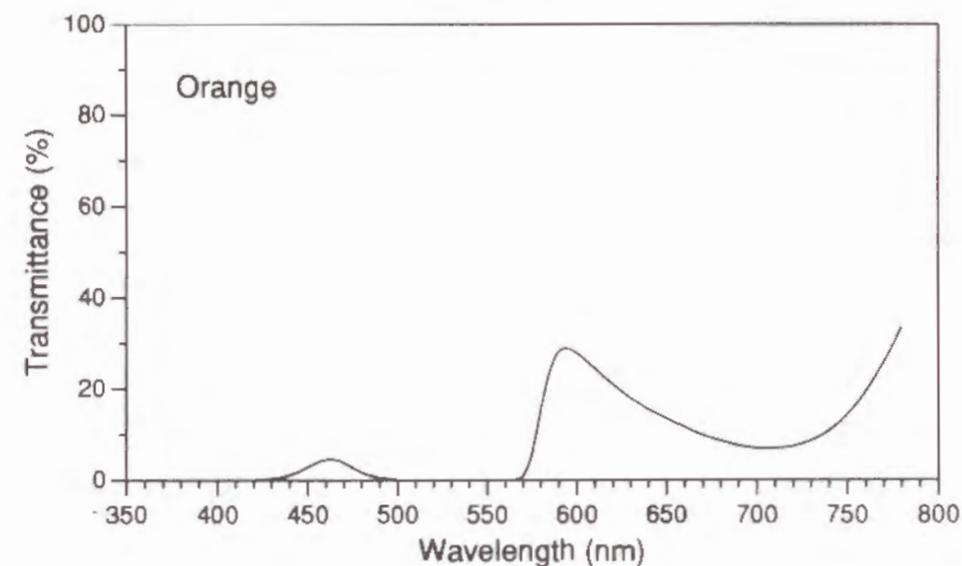
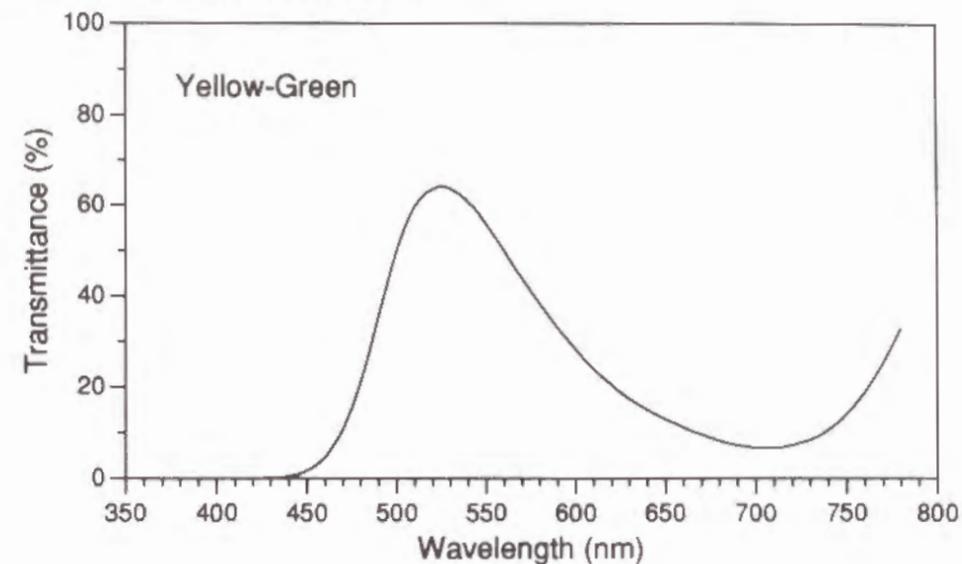
$$\log X_b = 1.993 + 1.263 \times 10^{-3} W$$

$$\log Y_b = 1.811 + 1.284 \times 10^{-3} W$$

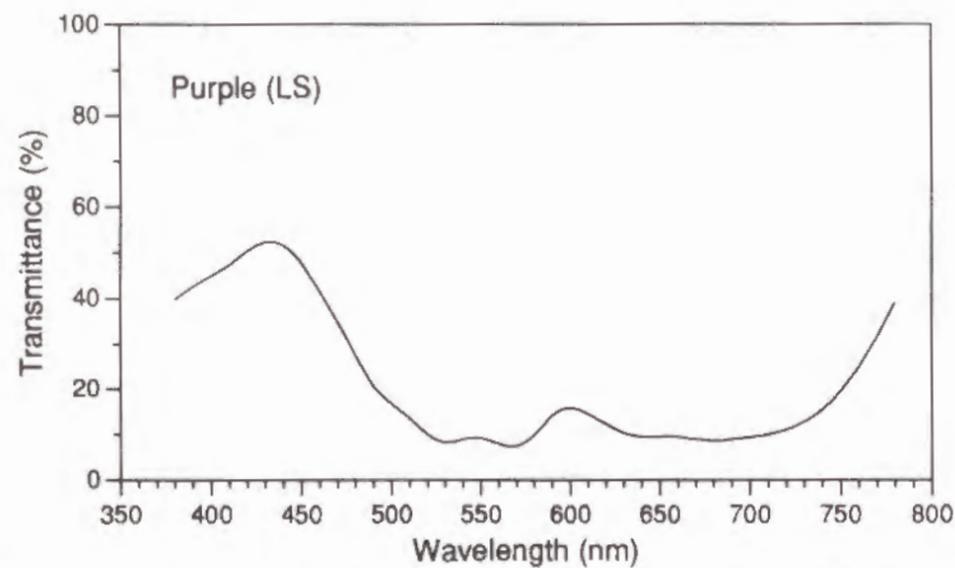
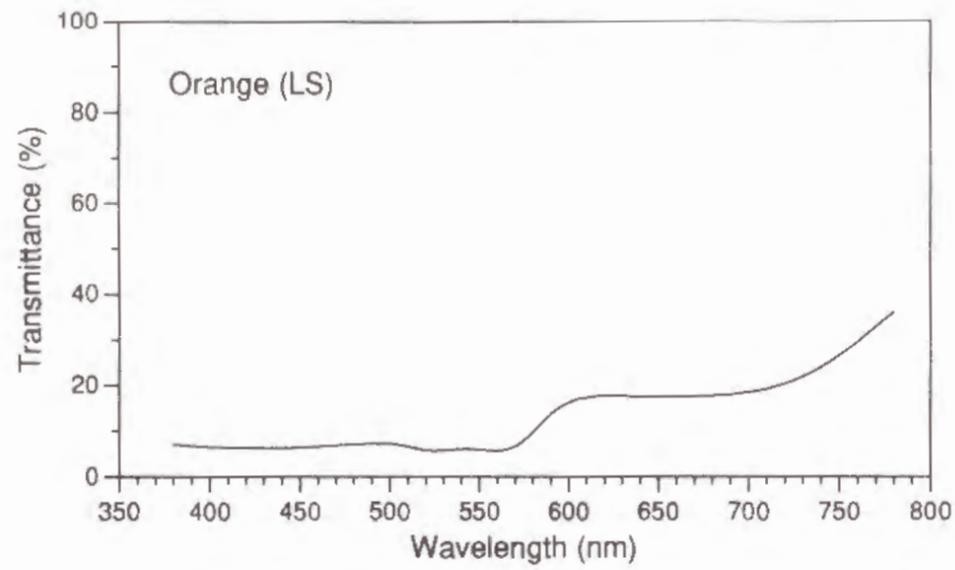
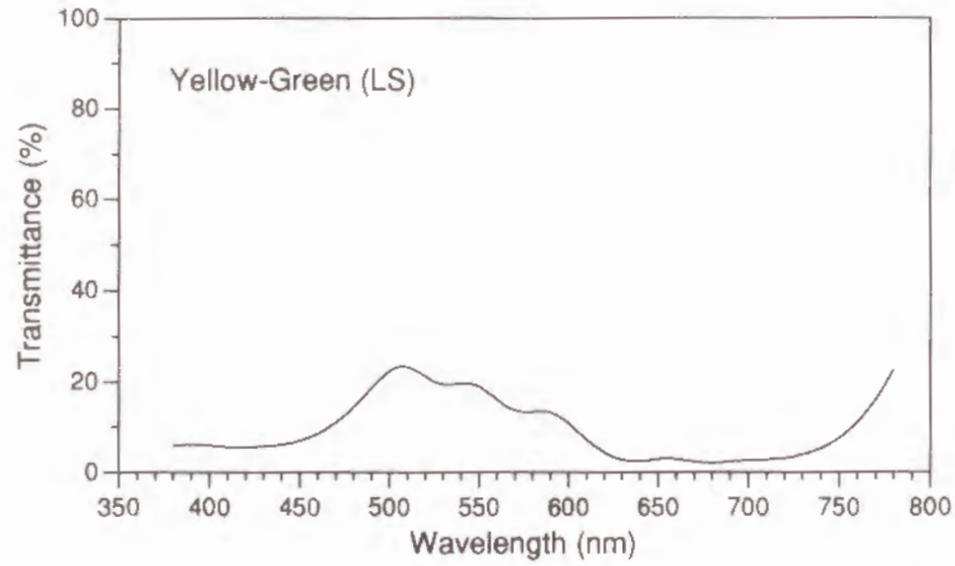
$$\log Z_b = 2.502 + 1.240 \times 10^{-3} W$$

(A-4)

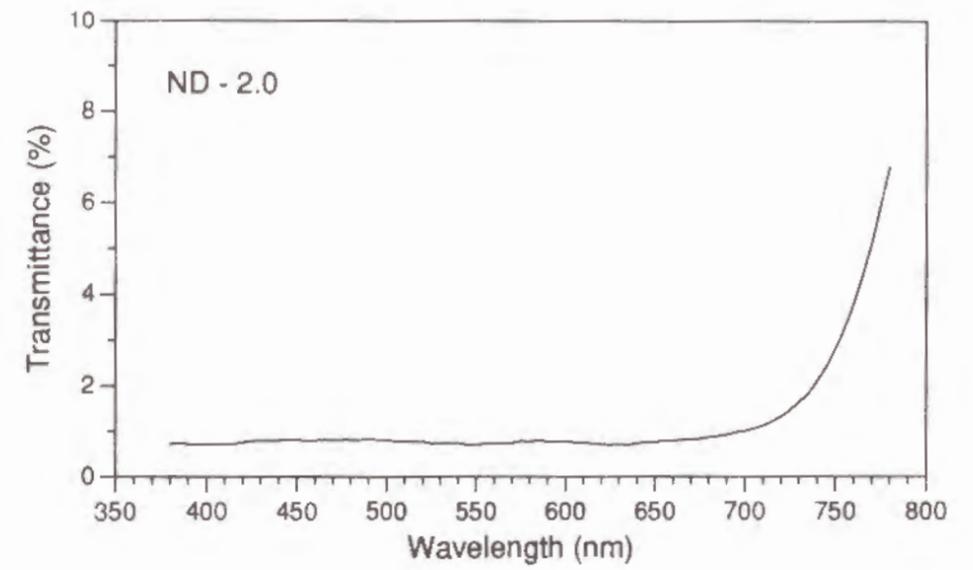
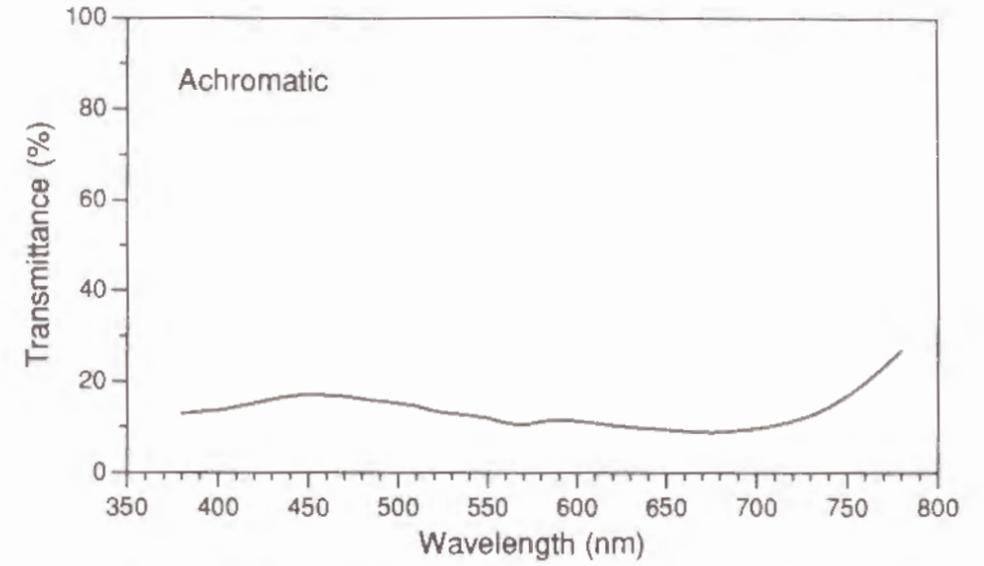
付録2：参照刺激の分光透過率(%）、日立カラーアナライザにて測定。



付図 A-1 参照刺激Yellow-Green、Orange、Purpleの分光透過率 (%)。日立カラーアナライザC-2000により測定 (付図 A-2、A-3も同じ)。

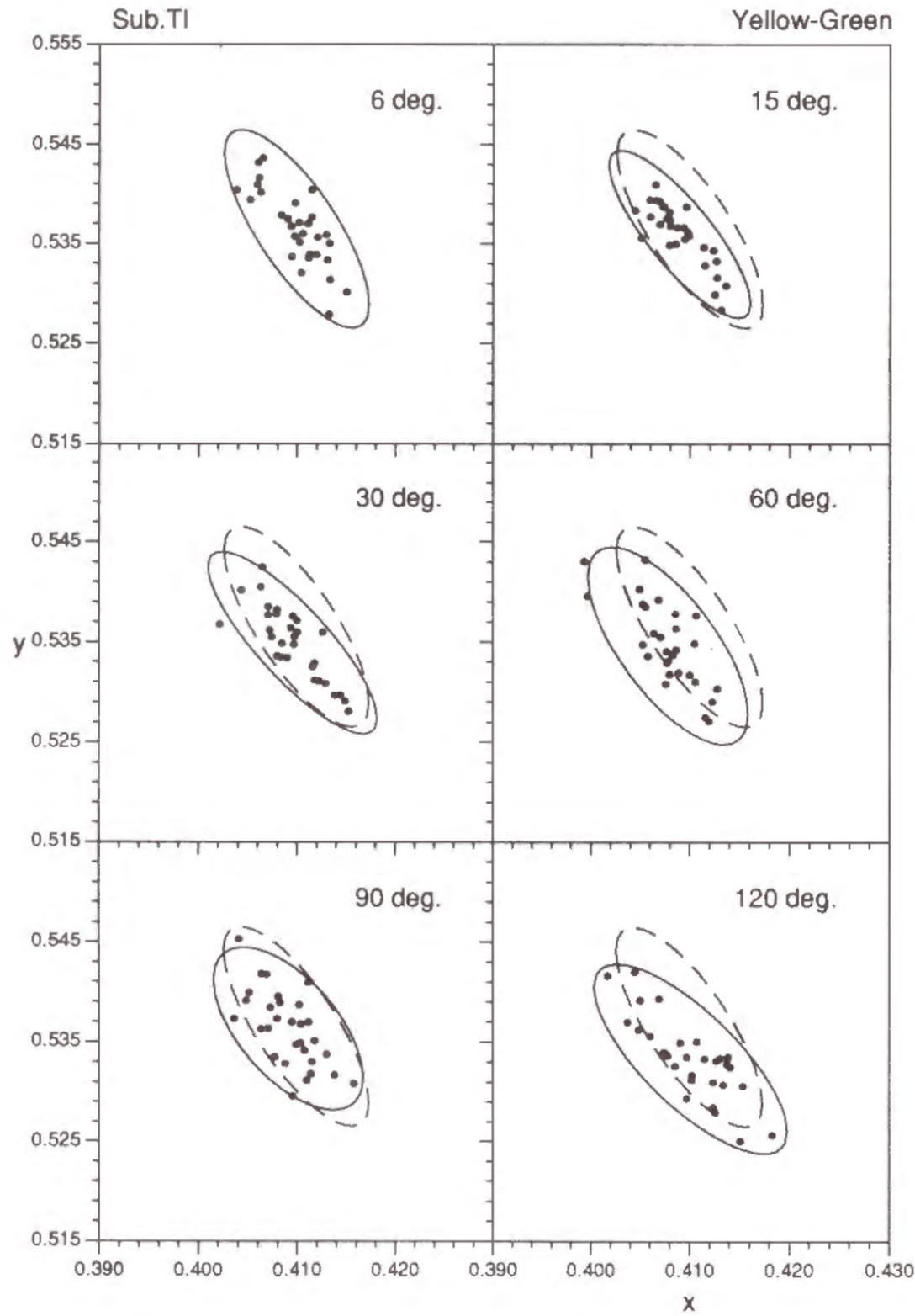


付図 A-2 参照刺激Yellow-Green(LS)、Orange(LS)、Purple(LS)の分光透過率(%)。

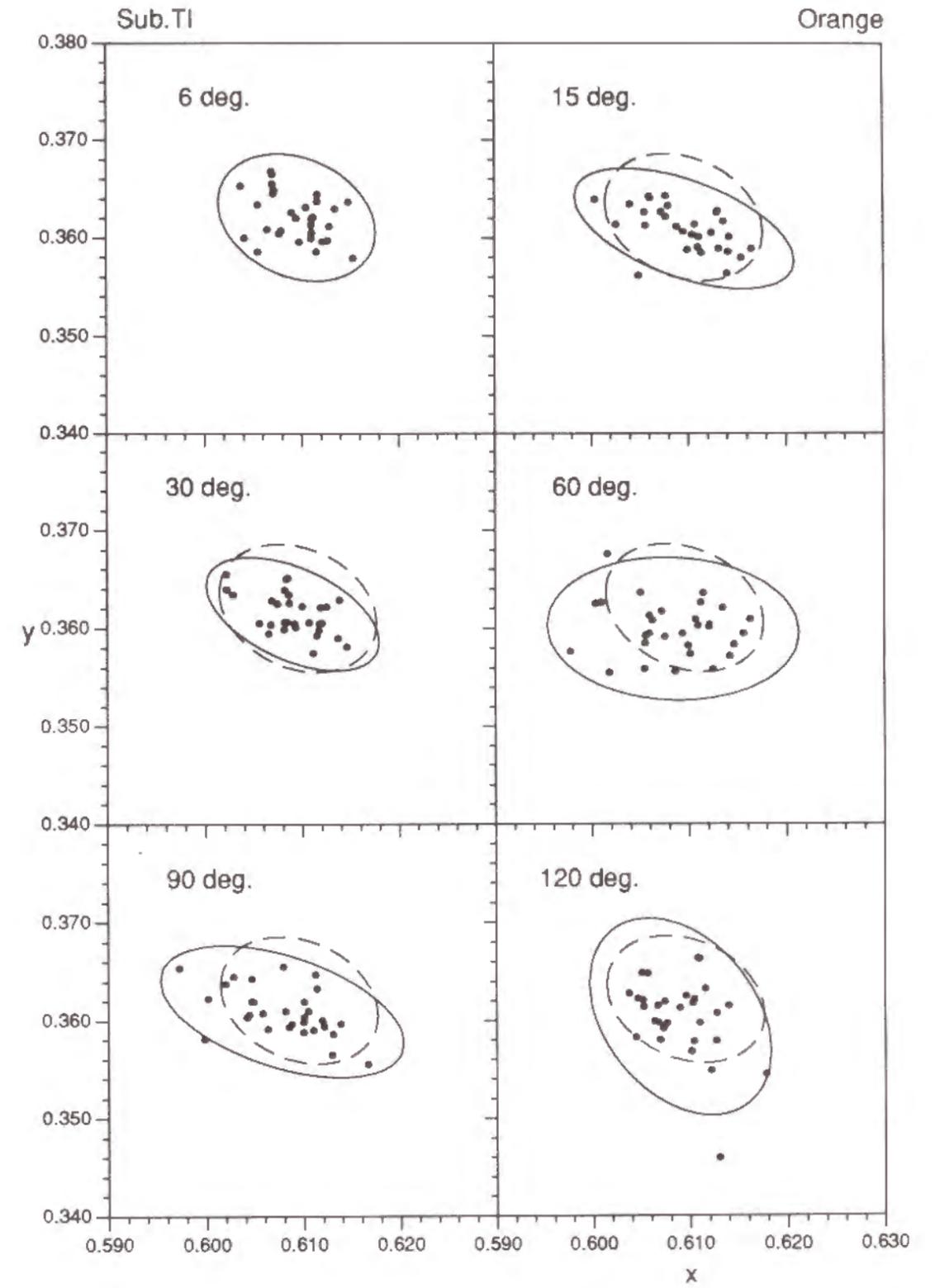


付図 A-3 参照刺激Achromatic、ND-2.0の分光透過率(%)。

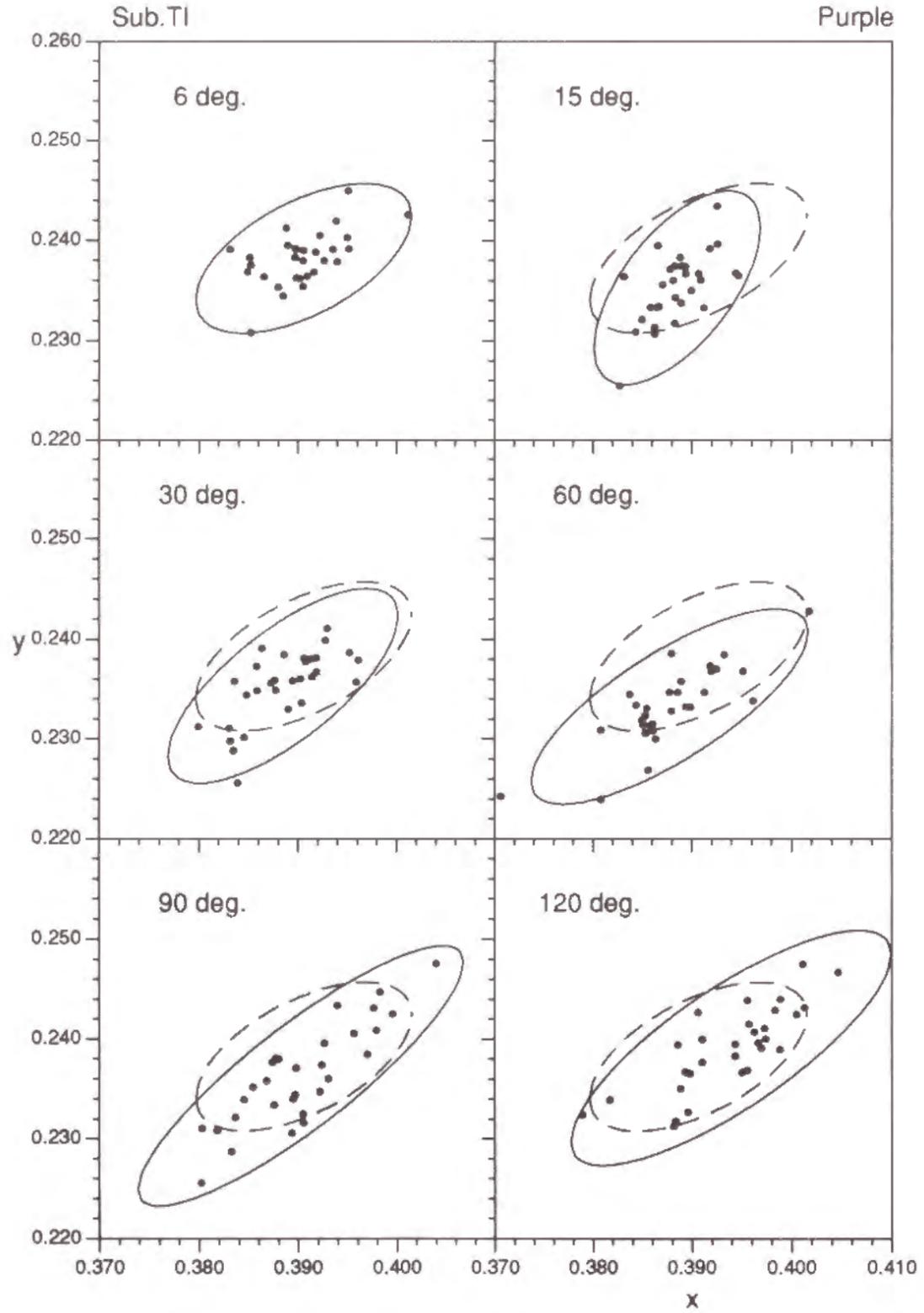
付録3：実験1での等色点と等色楕円体（被験者HSは本文中に記した）。



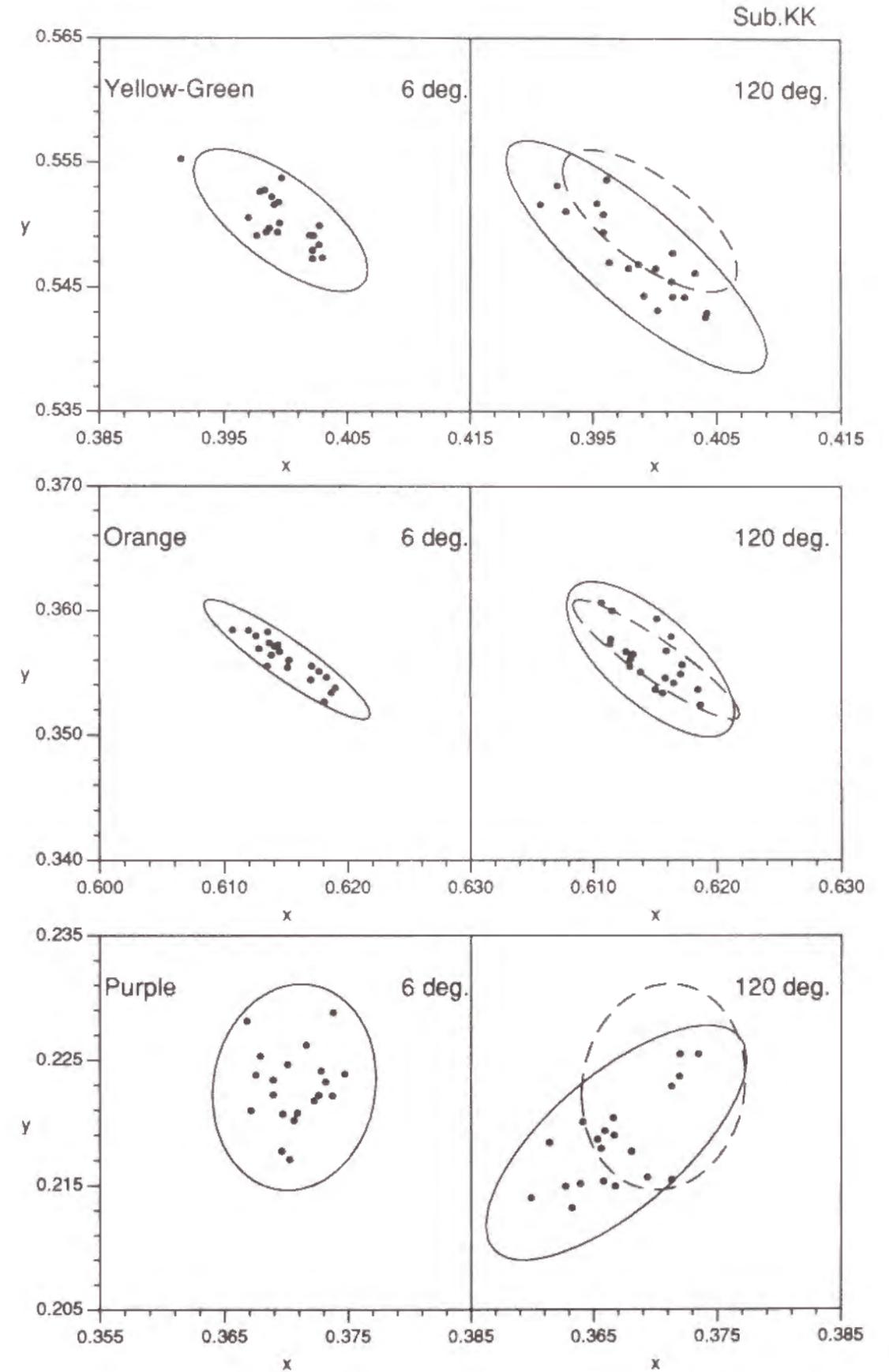
付図 A-4 被験者TIによる参照刺激Yellow-Greenに対する等色楕円体。黒点：等色点のxy色度図平面への投影、実線：中心を通る等輝度断面での楕円。比較のため刺激間隔6°での楕円を破線で描いた。



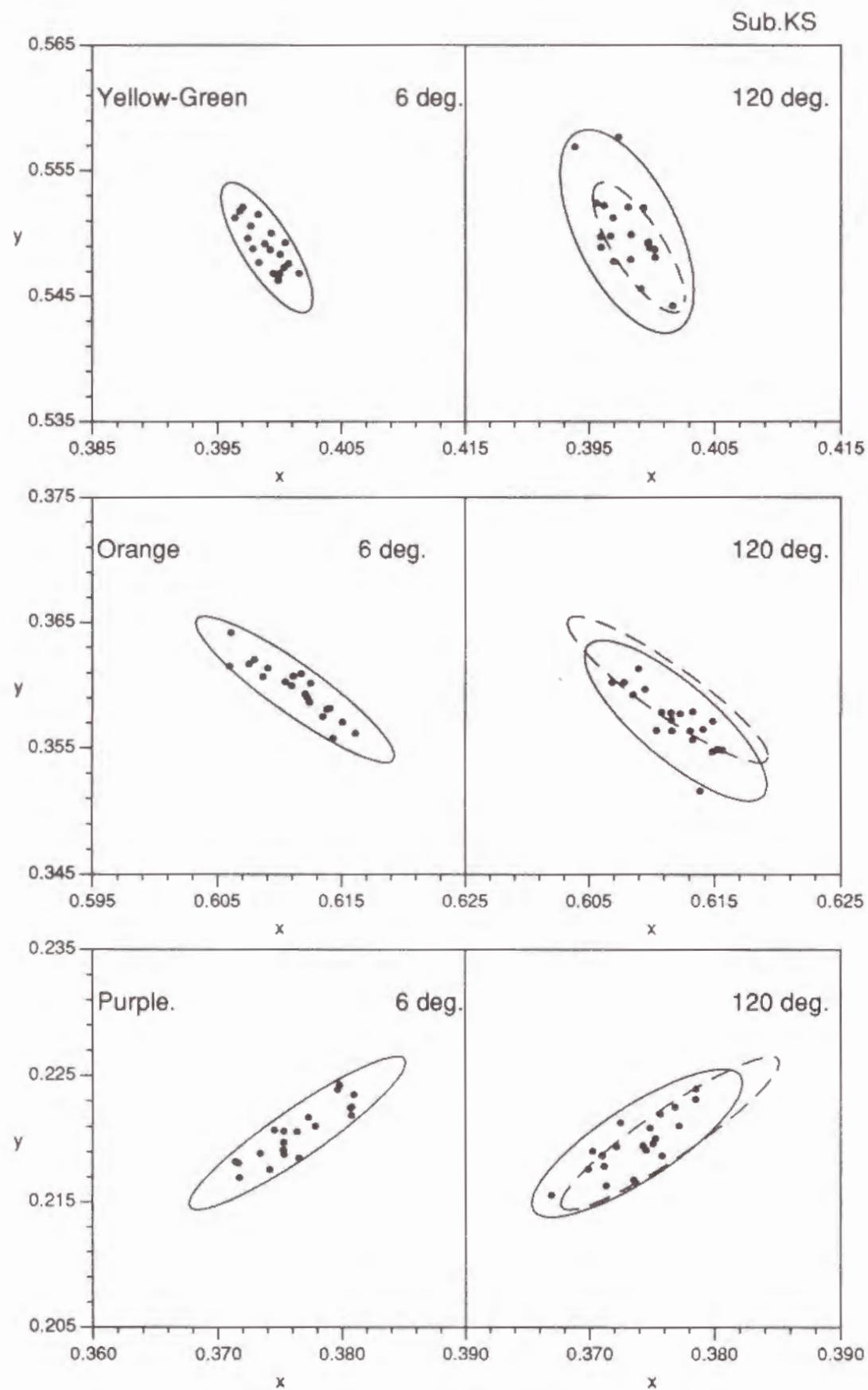
付図 A-5 被験者TIによる参照刺激Orangeに対する等色楕円体。



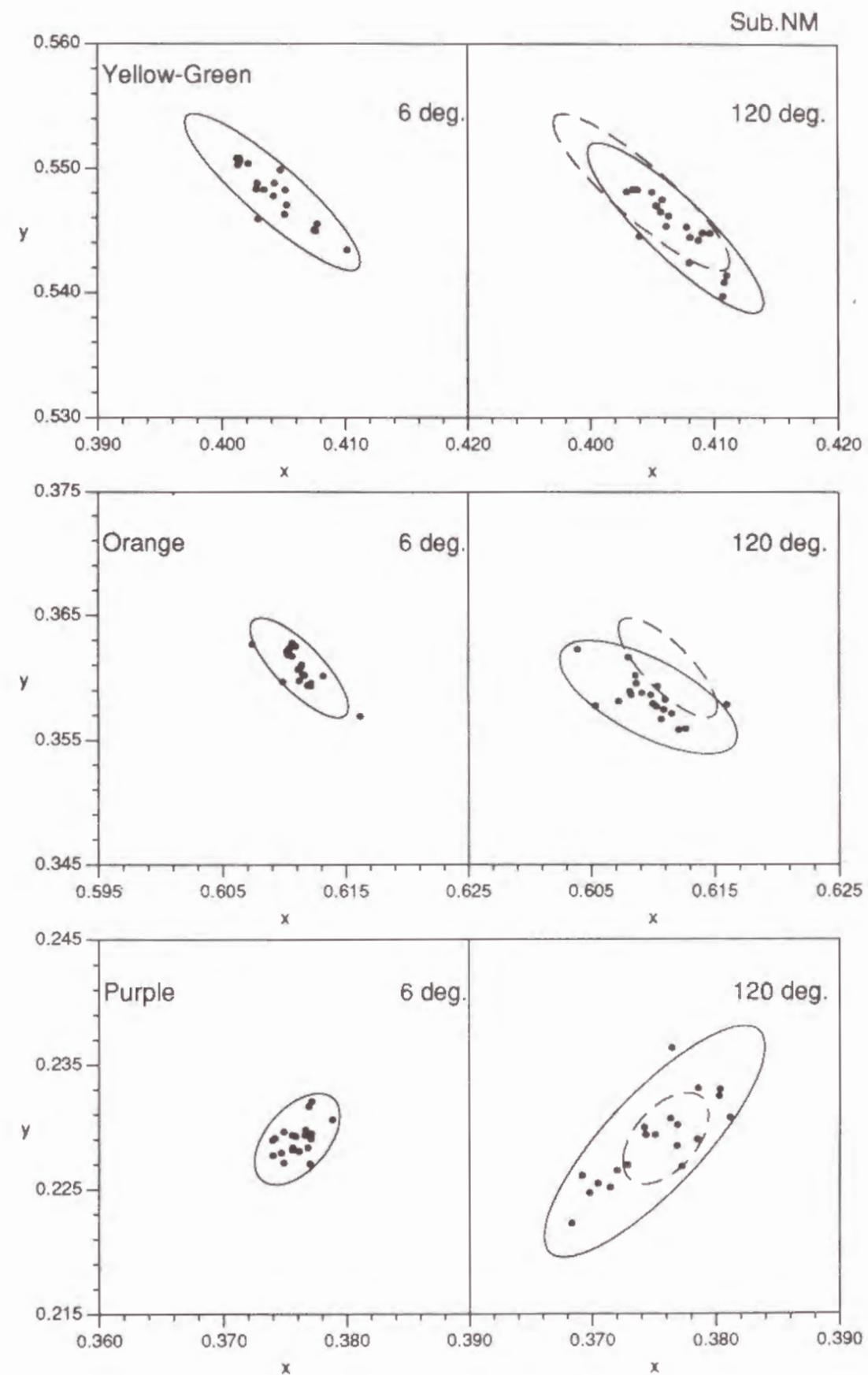
付図 A-6 被験者TIによる参照刺激Purpleに対する等色楕円体。



付図 A-7 被験者KKによる等色楕円体。

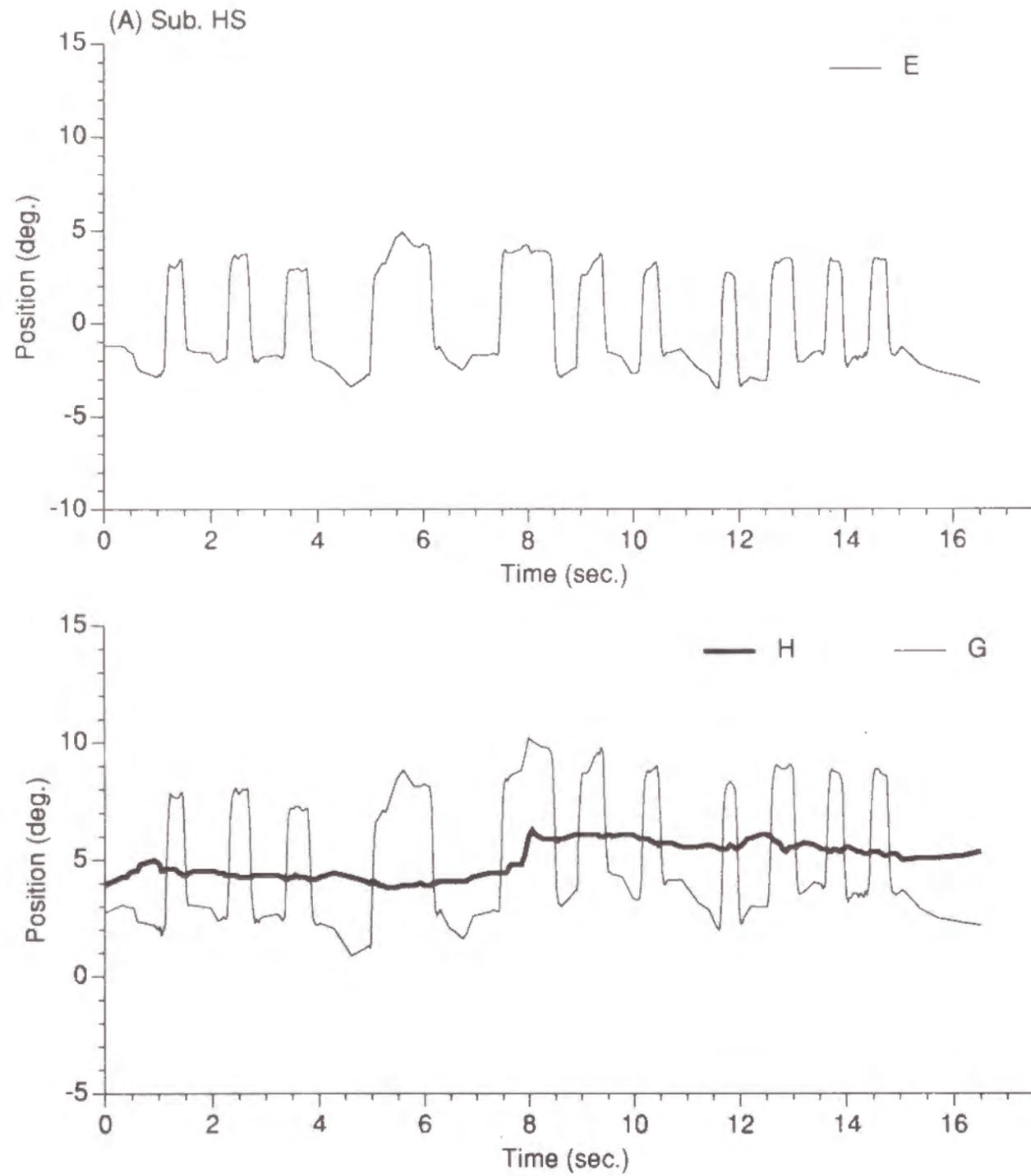


付図 A-8 被験者KSによる等色楕円体。

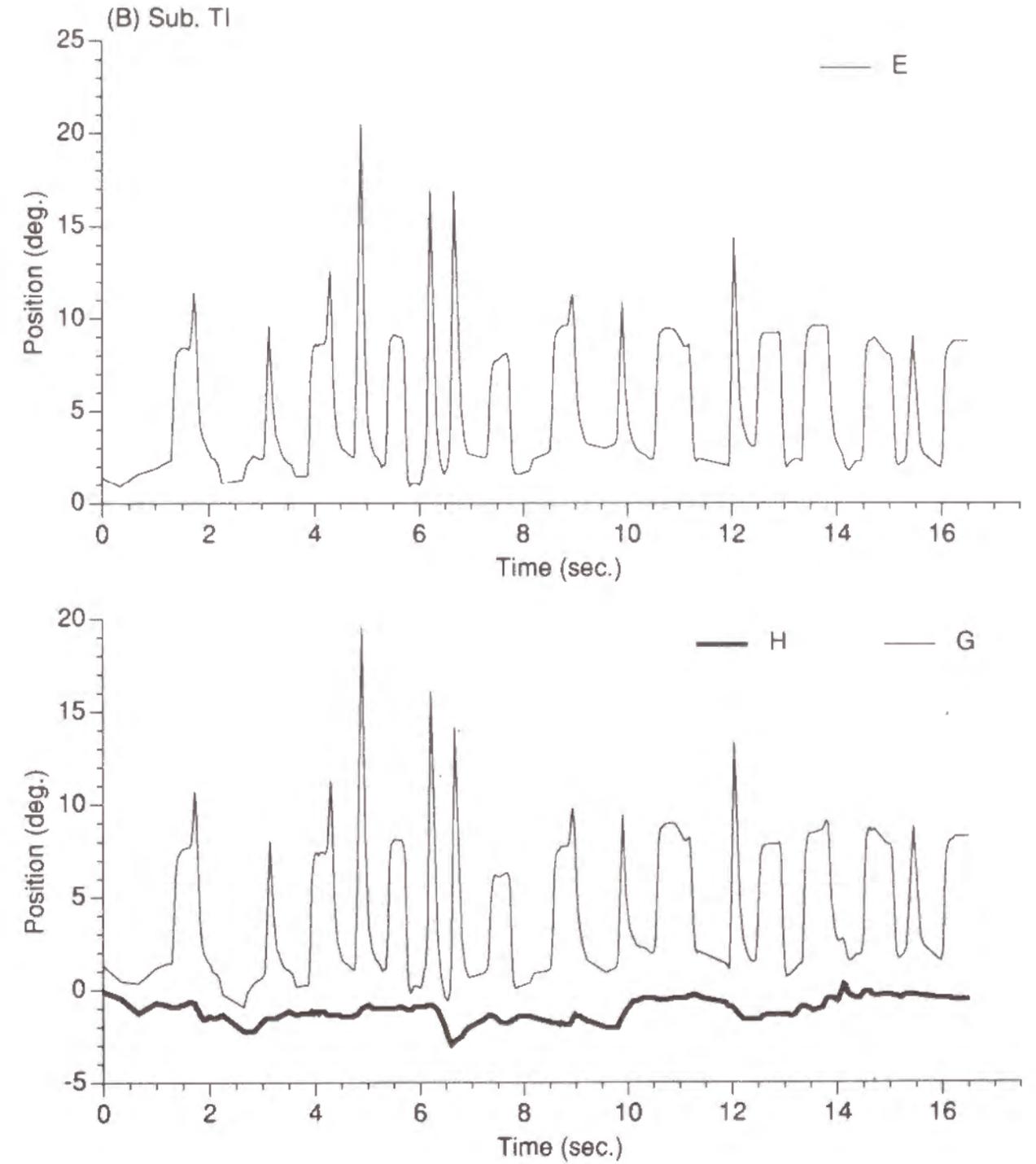


付図 A-9 被験者NMによる等色楕円体。

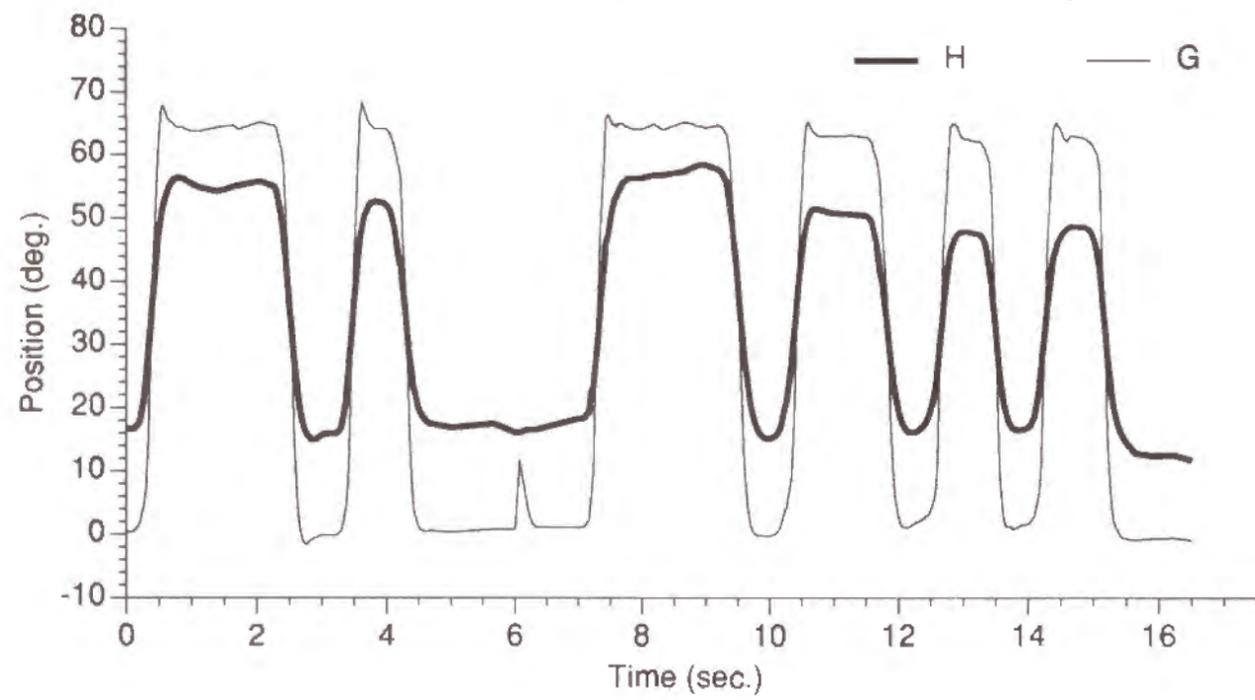
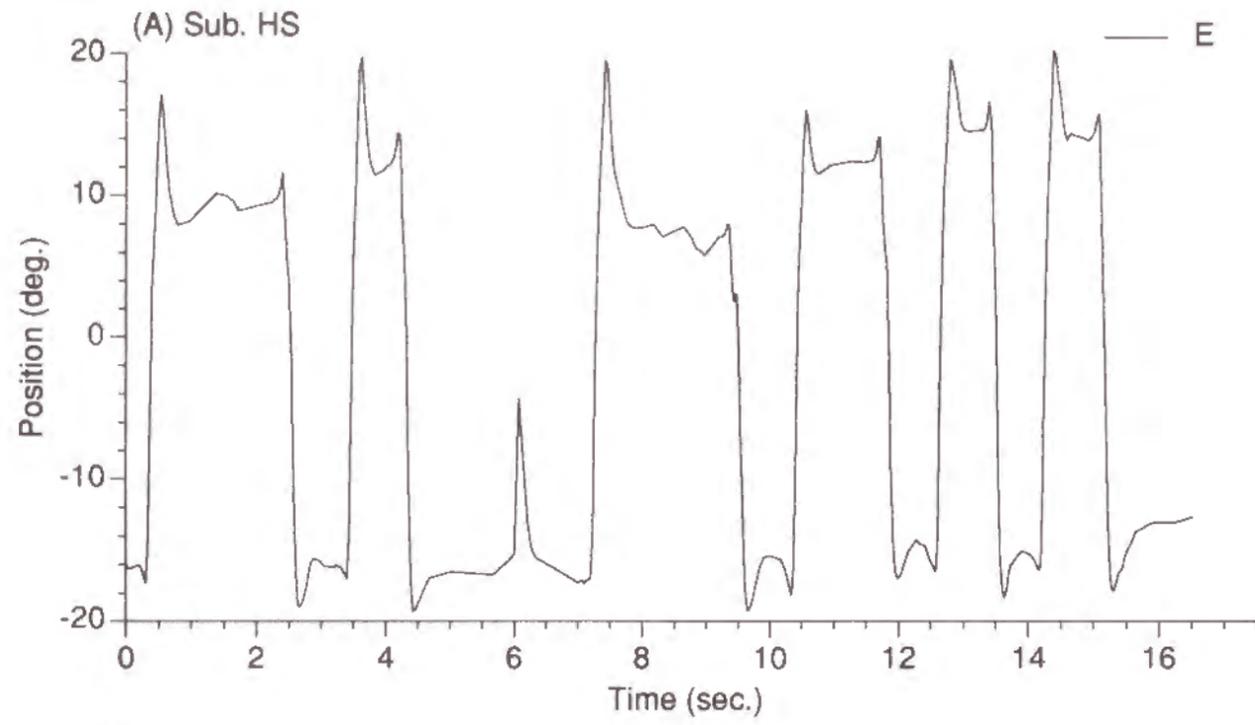
付録4：実験4で得られた眼球、頭部、視点の動き。



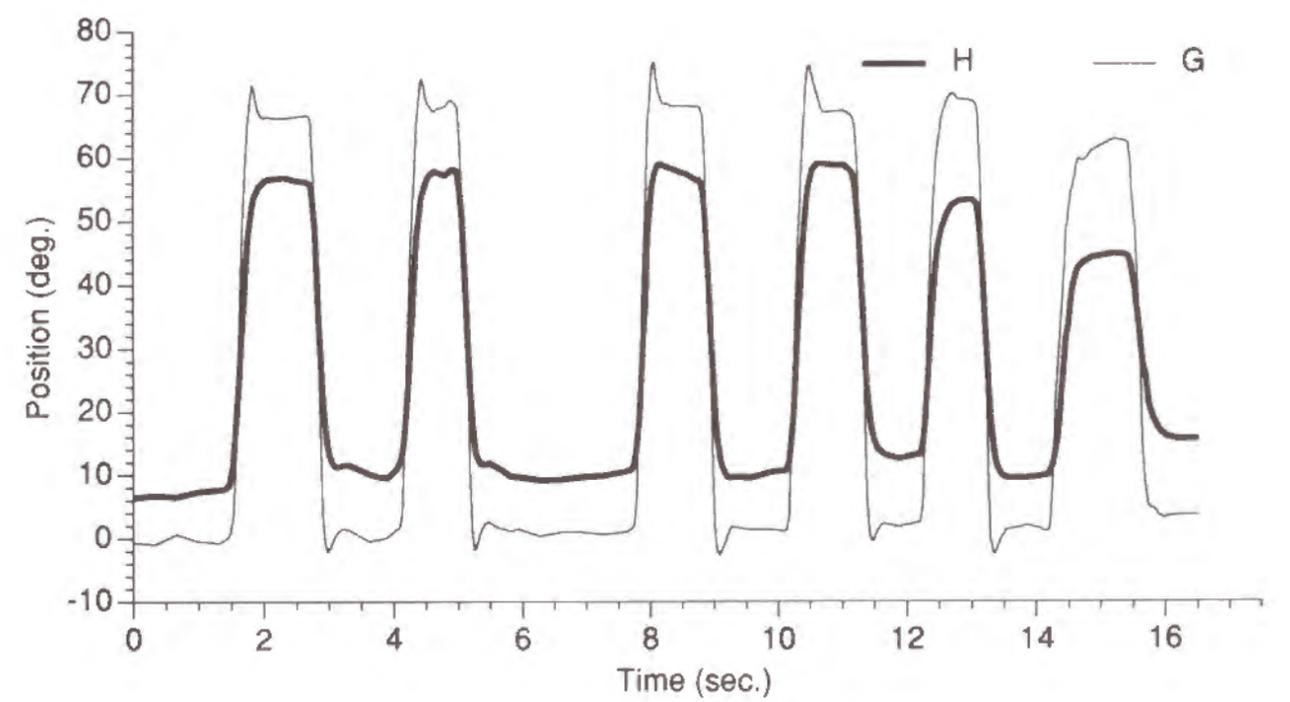
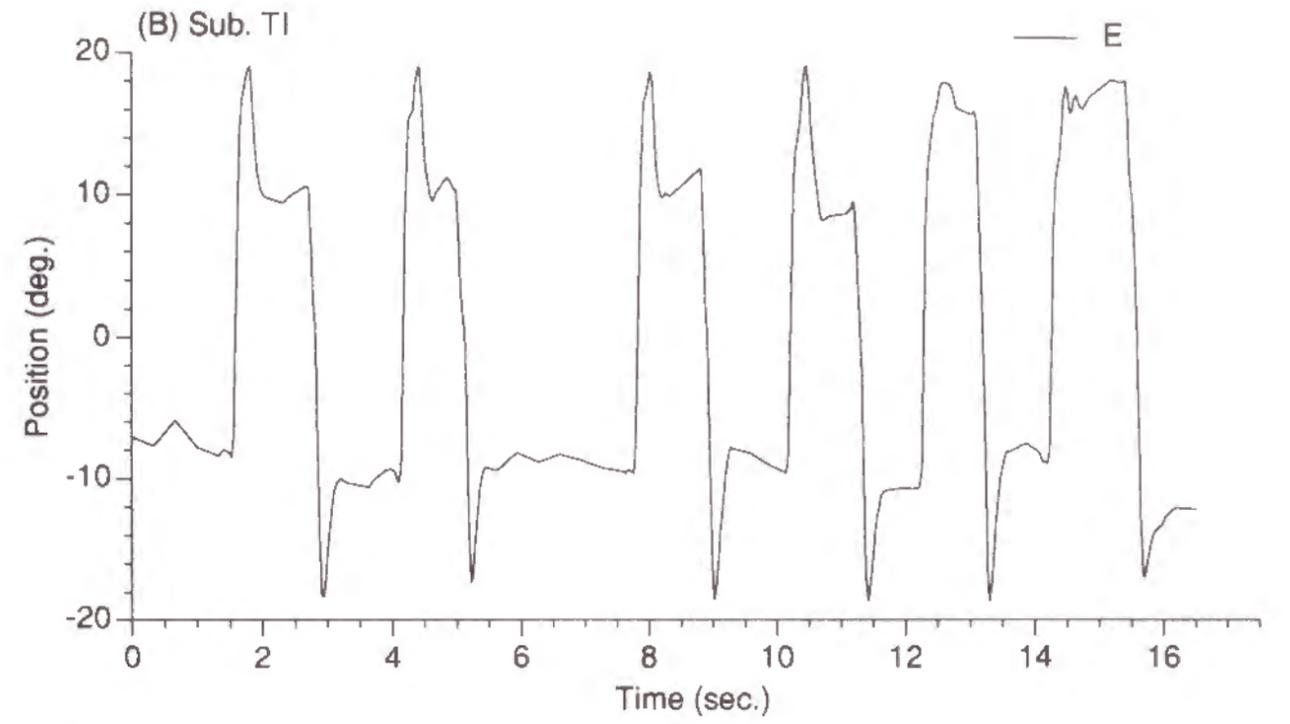
付図 A-10(A) 等色作業中の眼球、頭部、視線の動き。被験者HS、刺激間隔は6°。  
 図4-2中の大きな黒点で示される回の終了前16.5秒間の位置を解析した。上段グラフ：頭部方向に対する眼球の方向E、下段グラフ：等色刺激に対する頭部H（太い実線）と視点G（細い実線）の方向。いずれも等色刺激の方向を0とし、左を正方向にとった角度で示す。



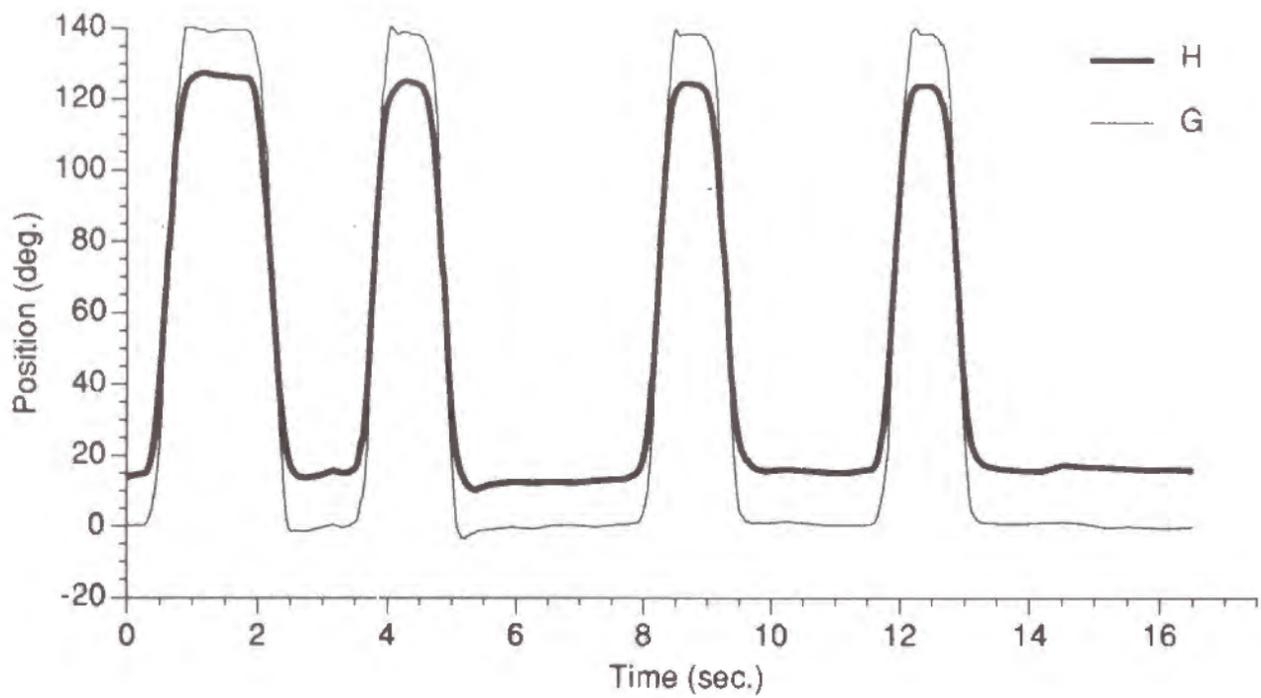
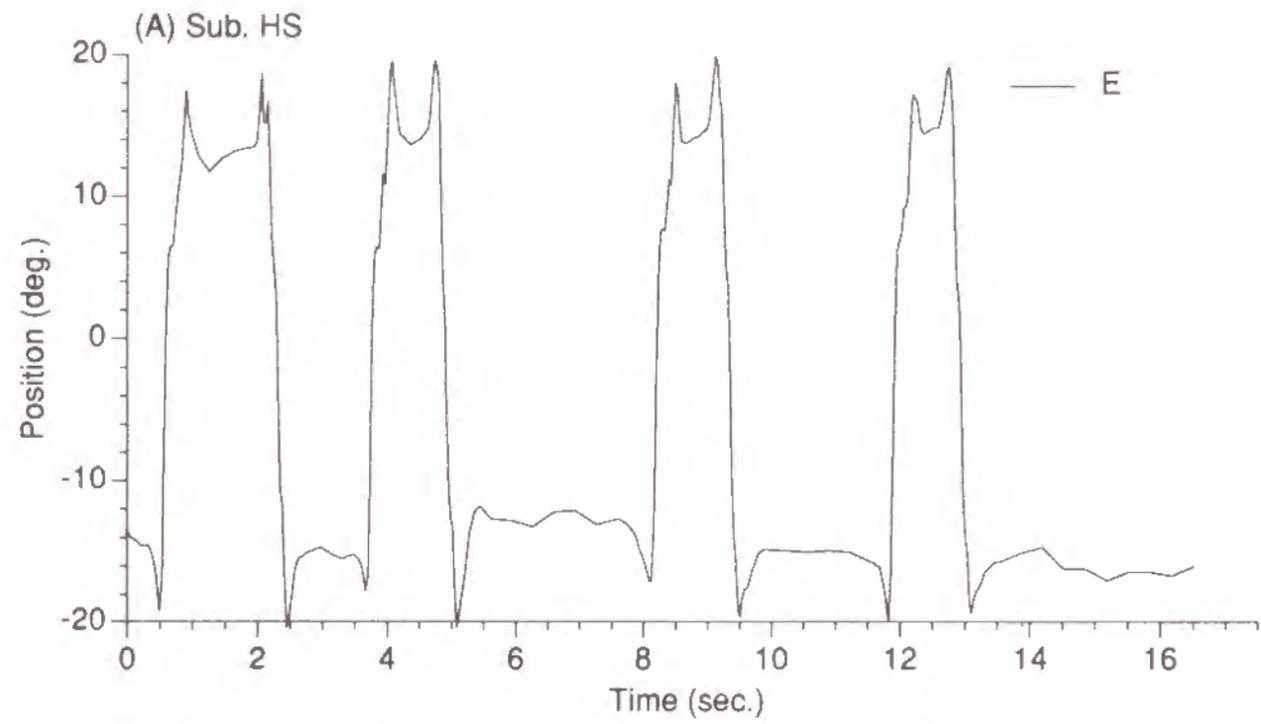
付図 A-10(B) 等色作業中の眼球E、頭部H、視線の動きG。被験者TI、刺激間隔は6°。



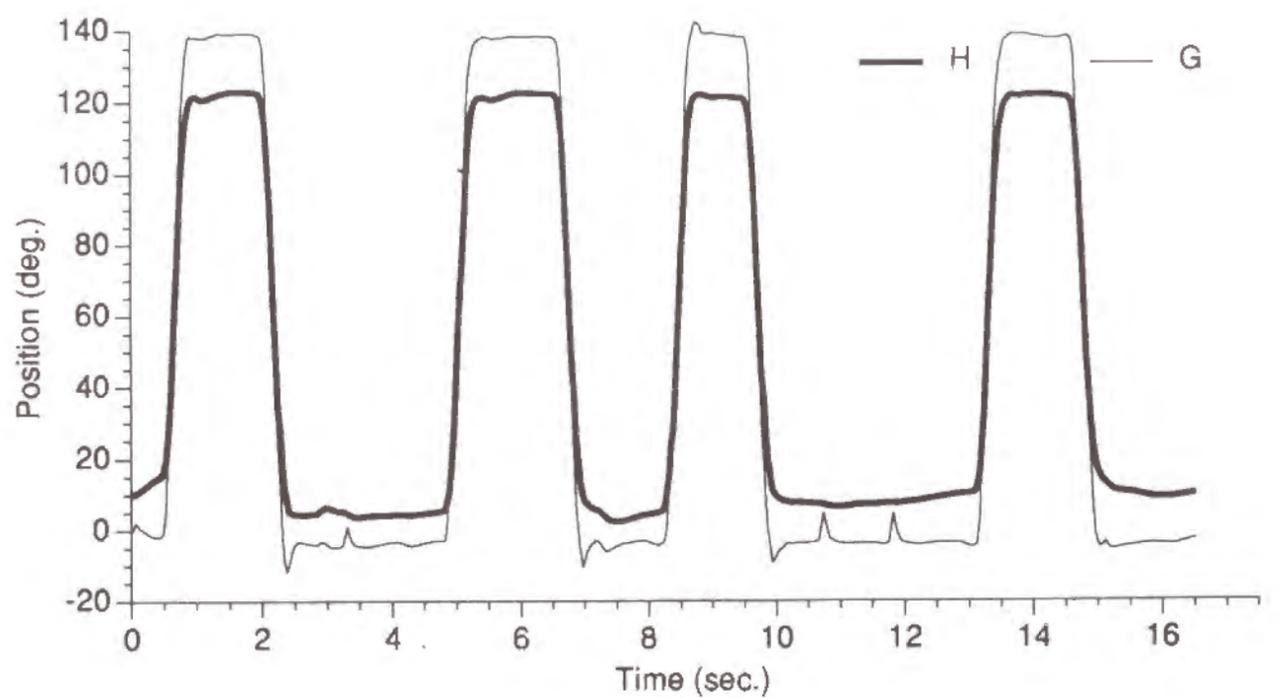
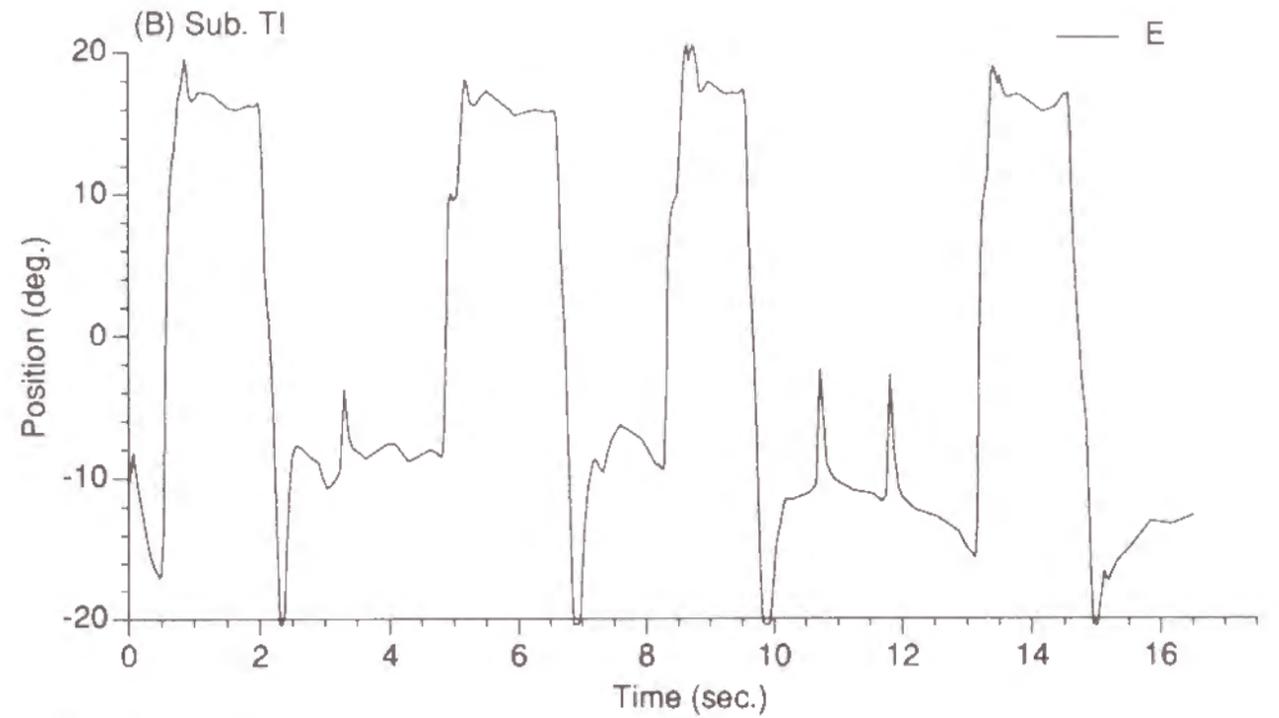
付図 A-11(A) 等色作業中の眼球E、頭部H、視線の動きG。被験者HS、刺激間隔は60°。



付図 A-11(B) 等色作業中の眼球E、頭部H、視線の動きG。被験者T1、刺激間隔は60°。

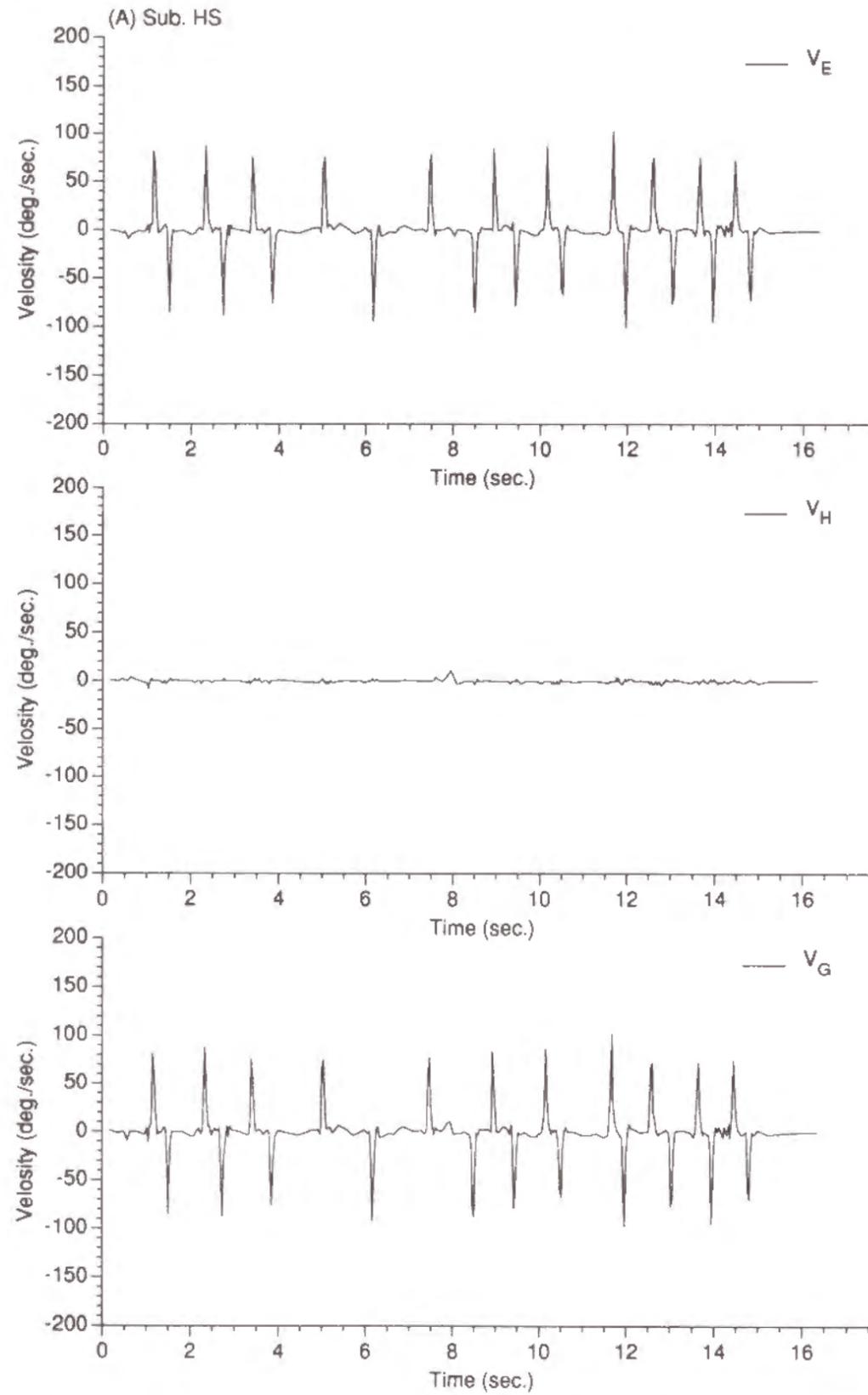


付図 A-12(A) 等色作業中の眼球E、頭部H、視線の動きG。被験者HS、刺激間隔は120°。

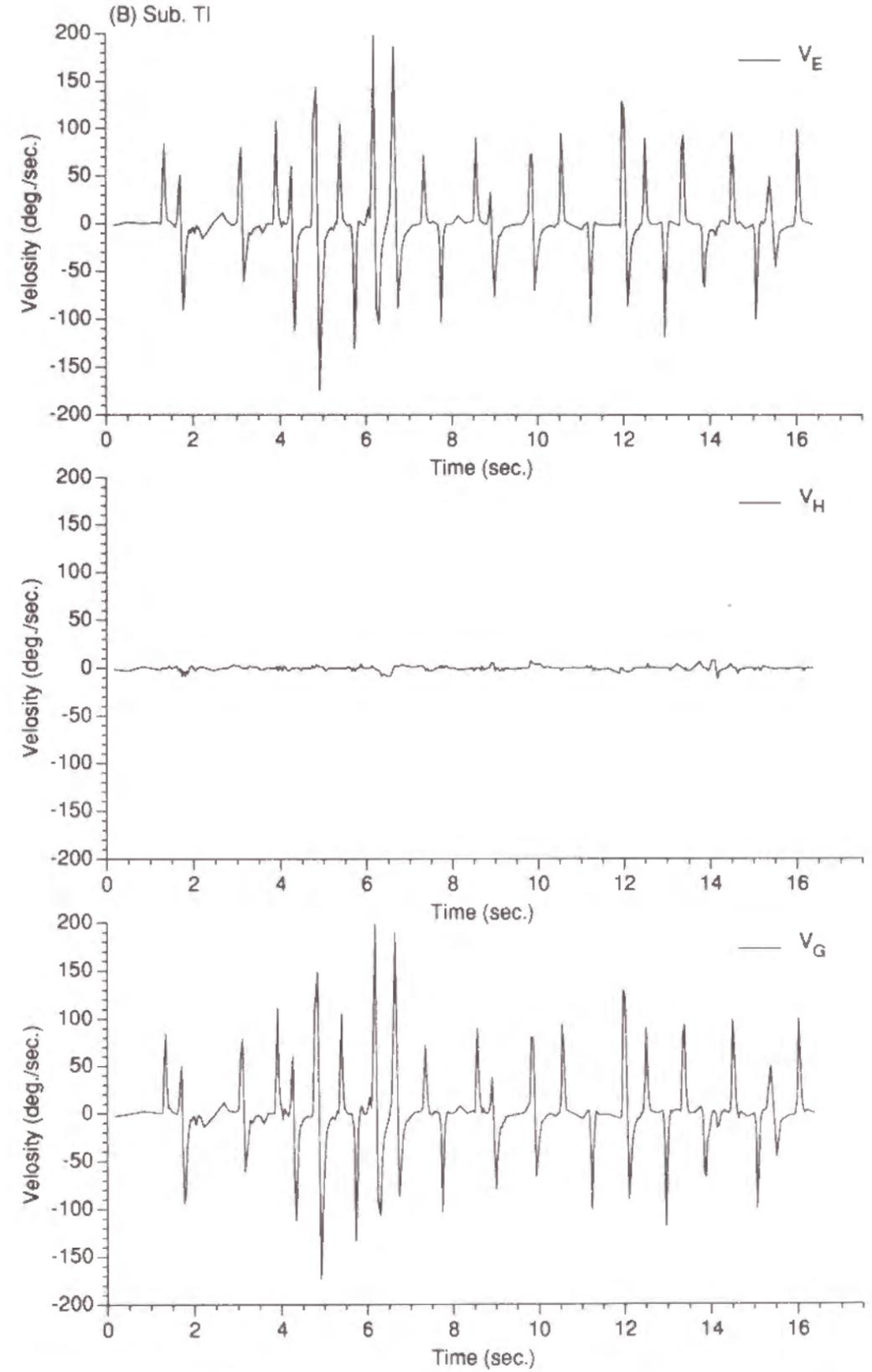


付図 A-12(B) 等色作業中の眼球E、頭部H、視線の動きG。被験者T1、刺激間隔は120°。

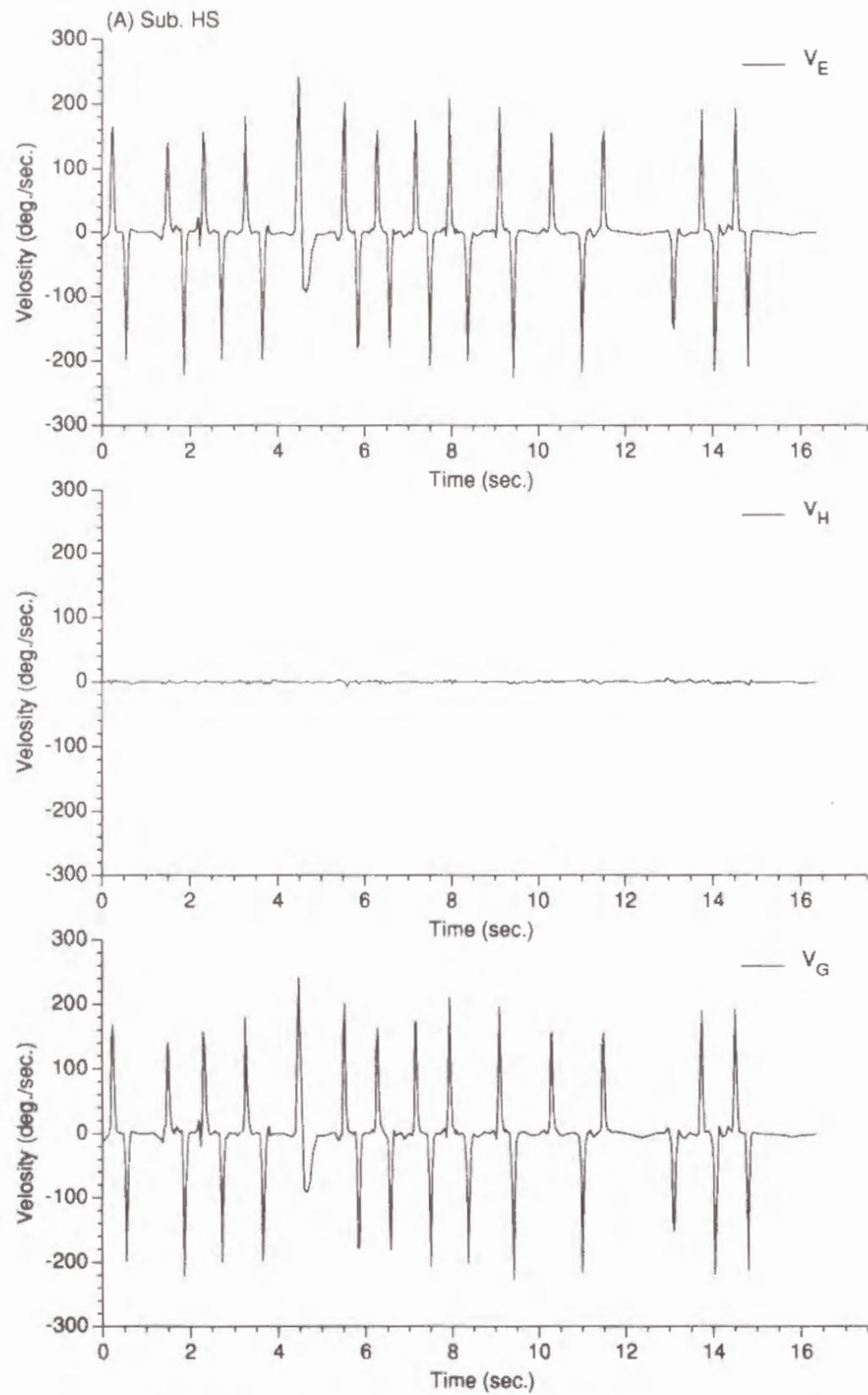
付録5：実験4で得られた眼球回転速度 $V_E$ 、頭部回転速度 $V_H$ 、視点移動速度 $V_G$ 。



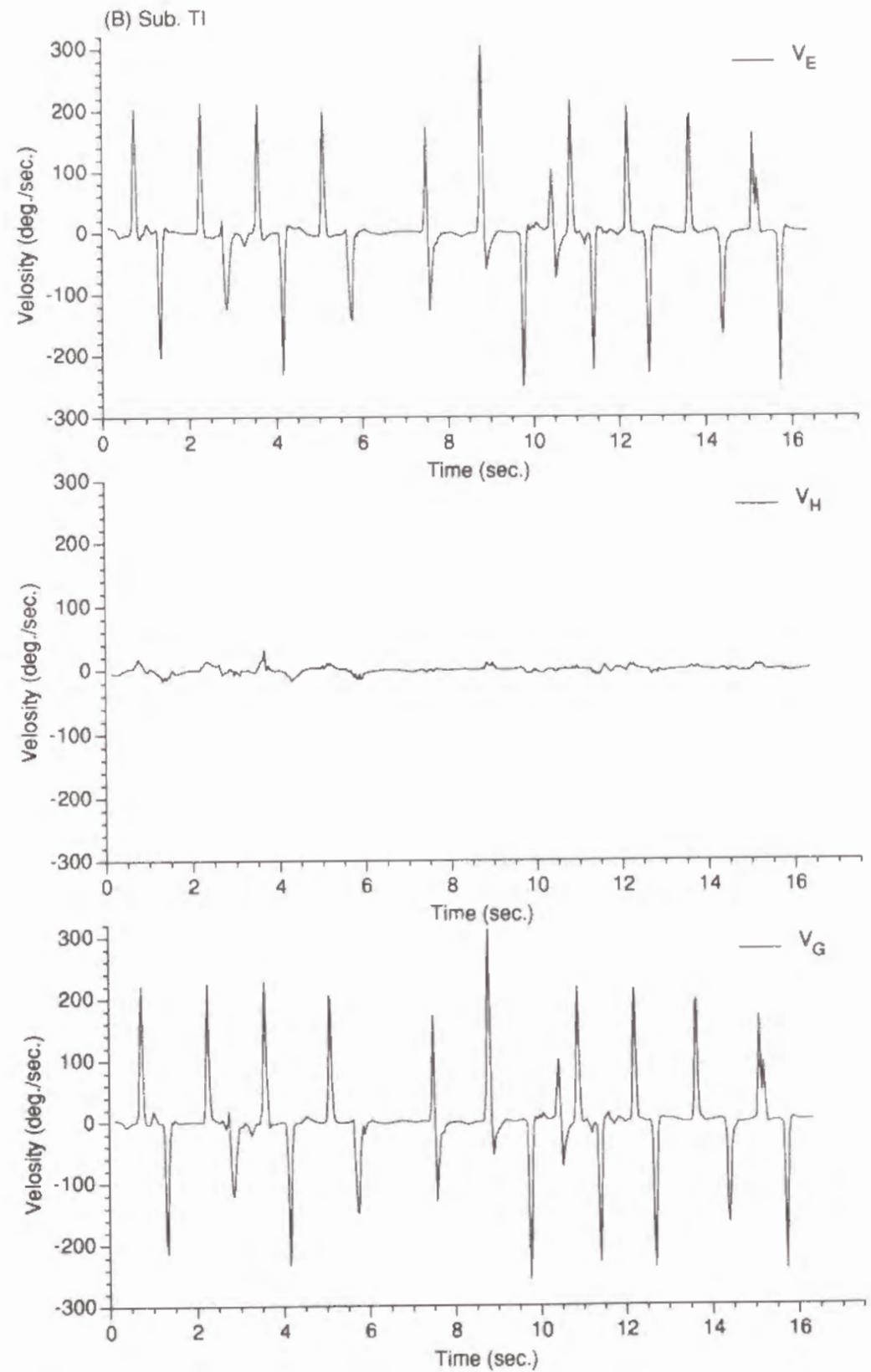
付図 A-13(A) 刺激間隔 $6^\circ$ での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。  
被験者HS。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。



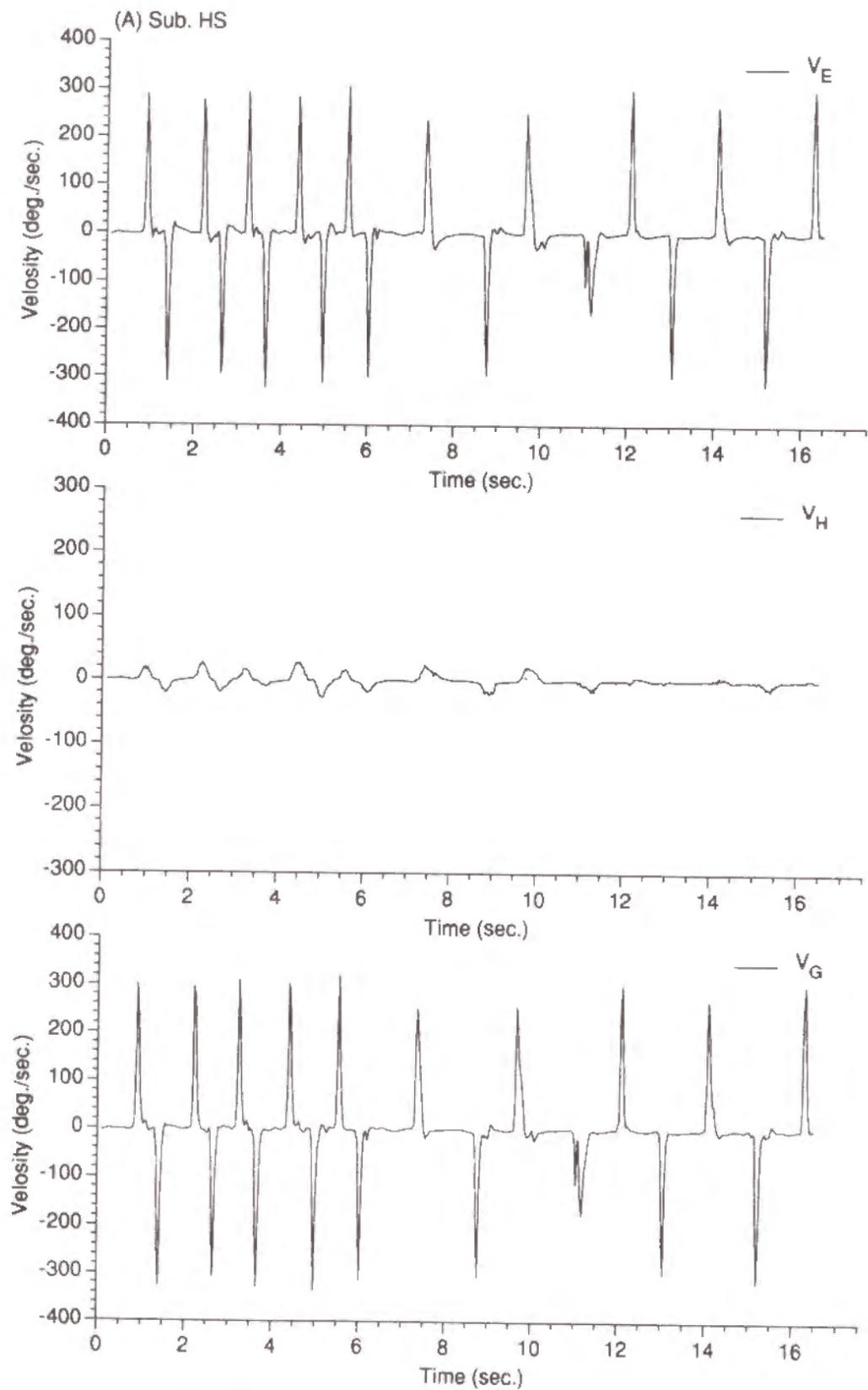
付図 A-13(B) 刺激間隔 $6^\circ$ での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。  
被験者TI。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。



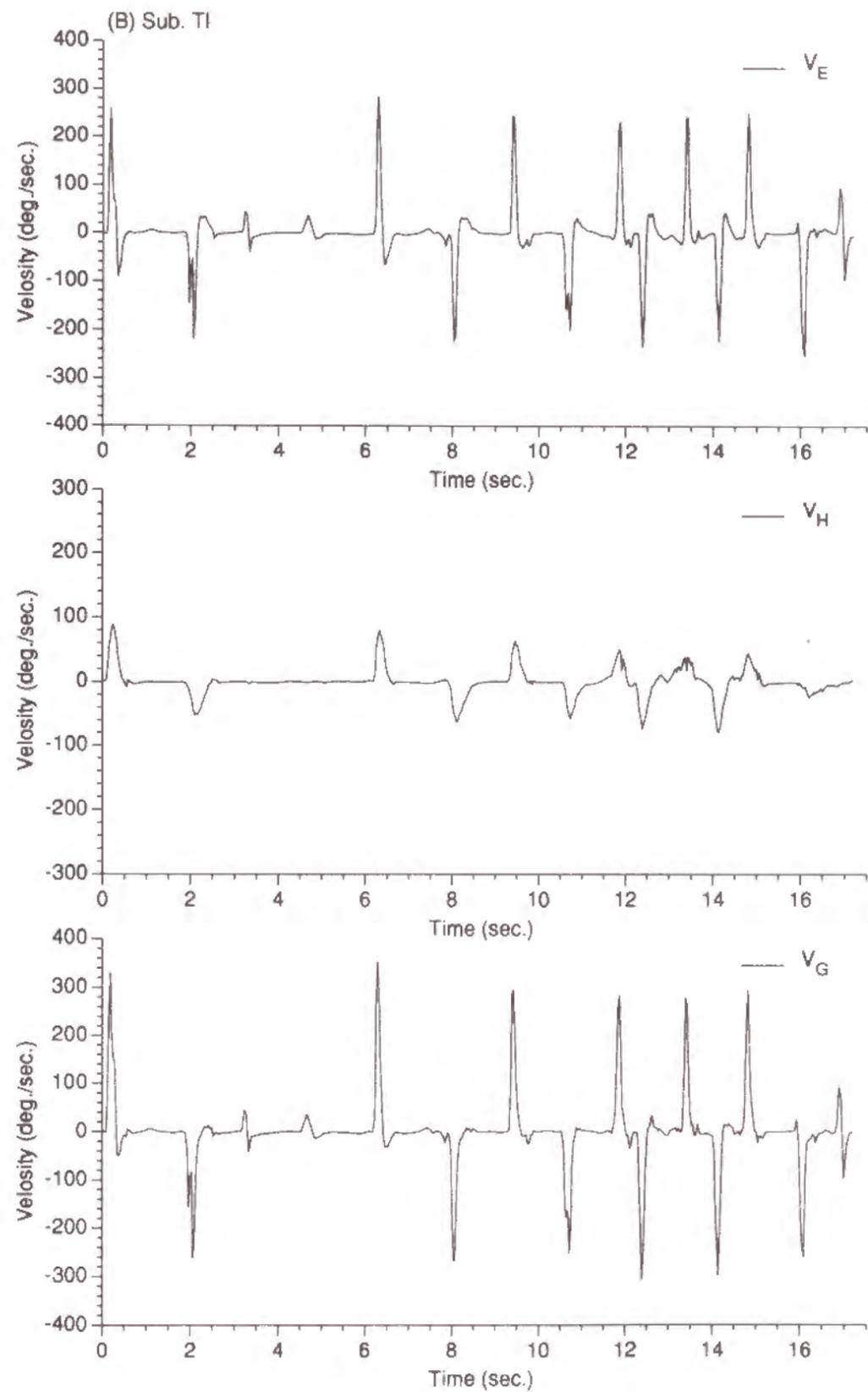
付図 A-14(A) 刺激間隔15°での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。  
被験者HS。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。



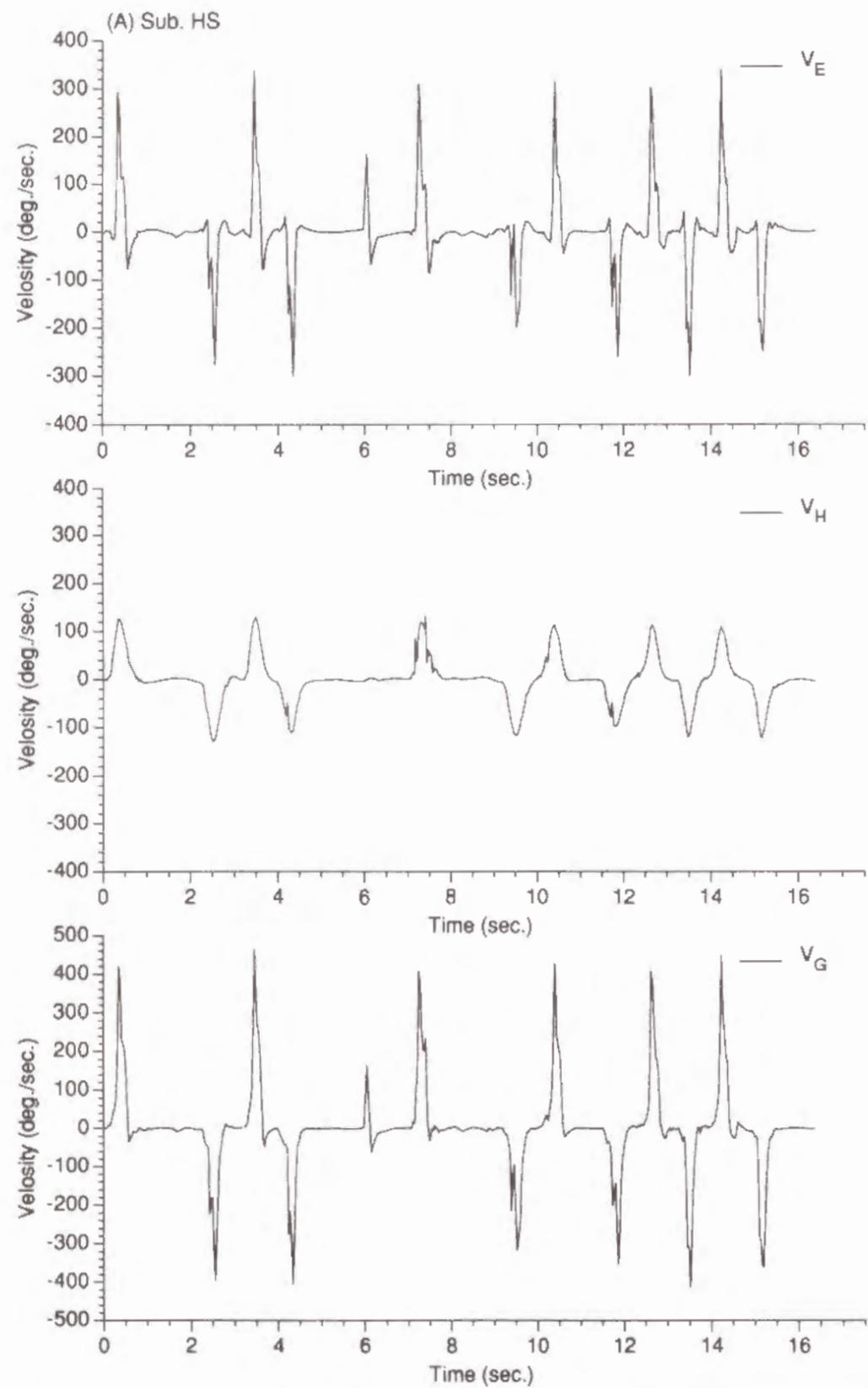
付図 A-14(B) 刺激間隔15°での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。  
被験者TI。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。



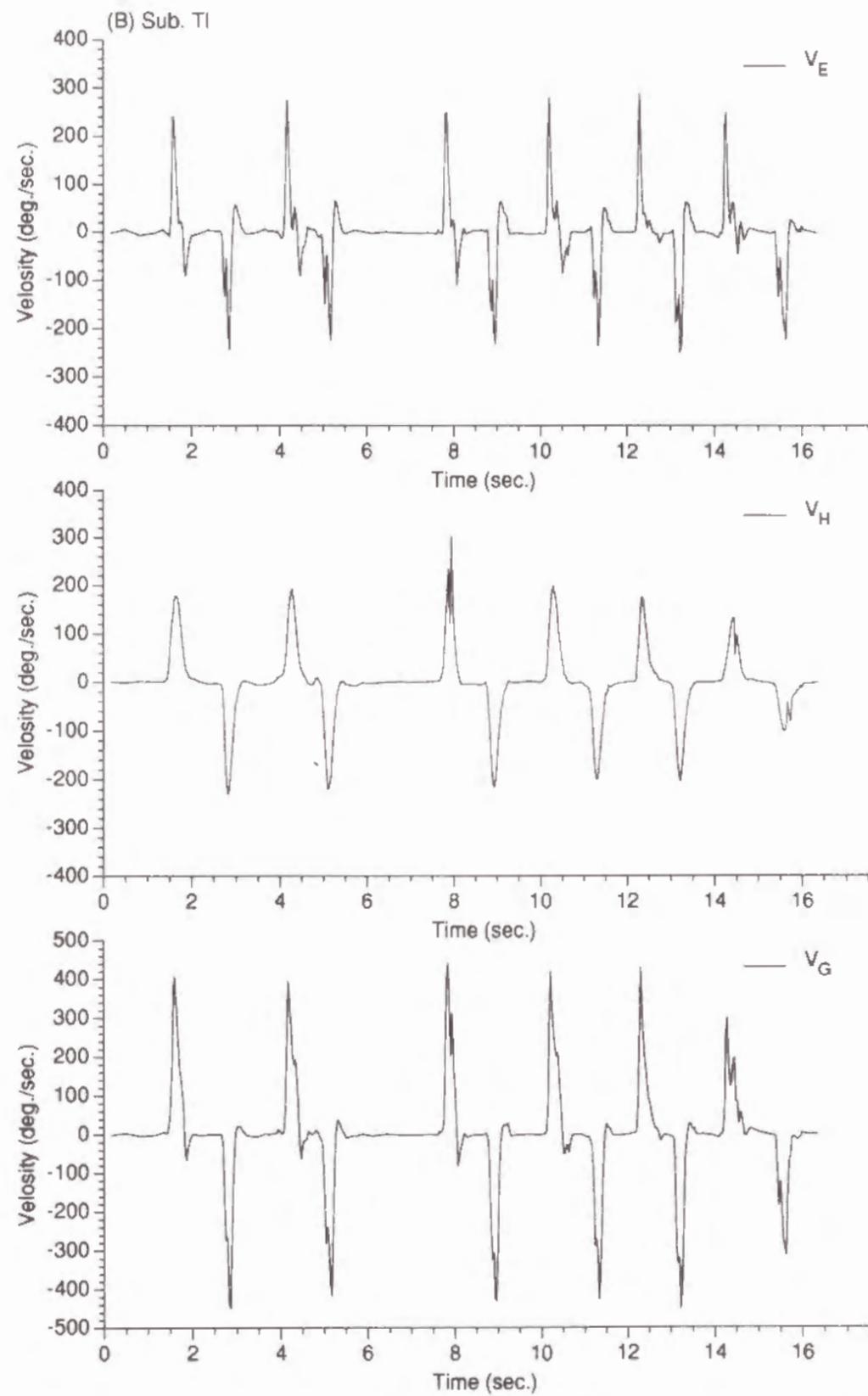
付図 A-15(A) 刺激間隔 $30^\circ$ での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。  
被験者HS。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。



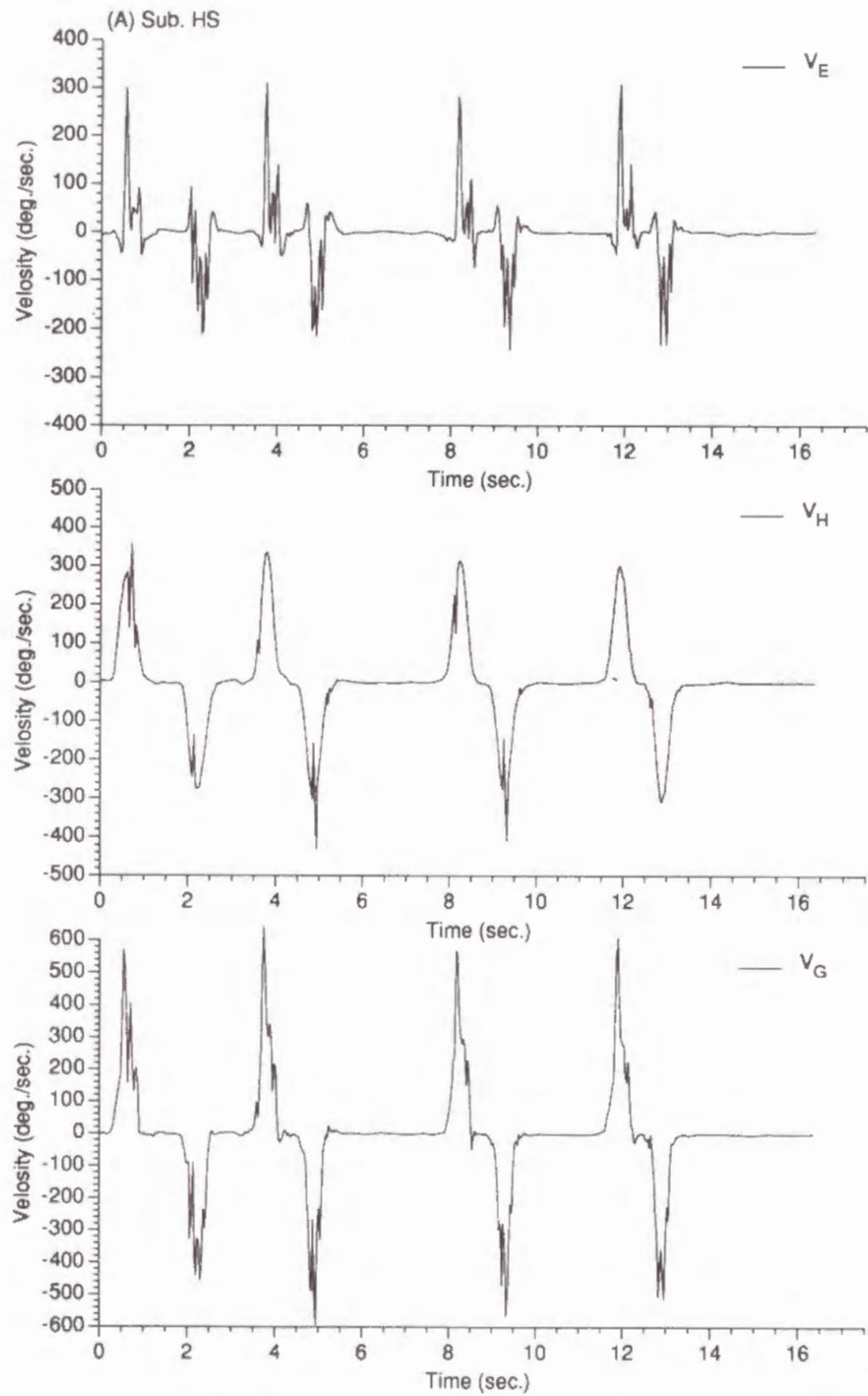
付図 A-15(B) 刺激間隔 $30^\circ$ での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。  
被験者TI。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。



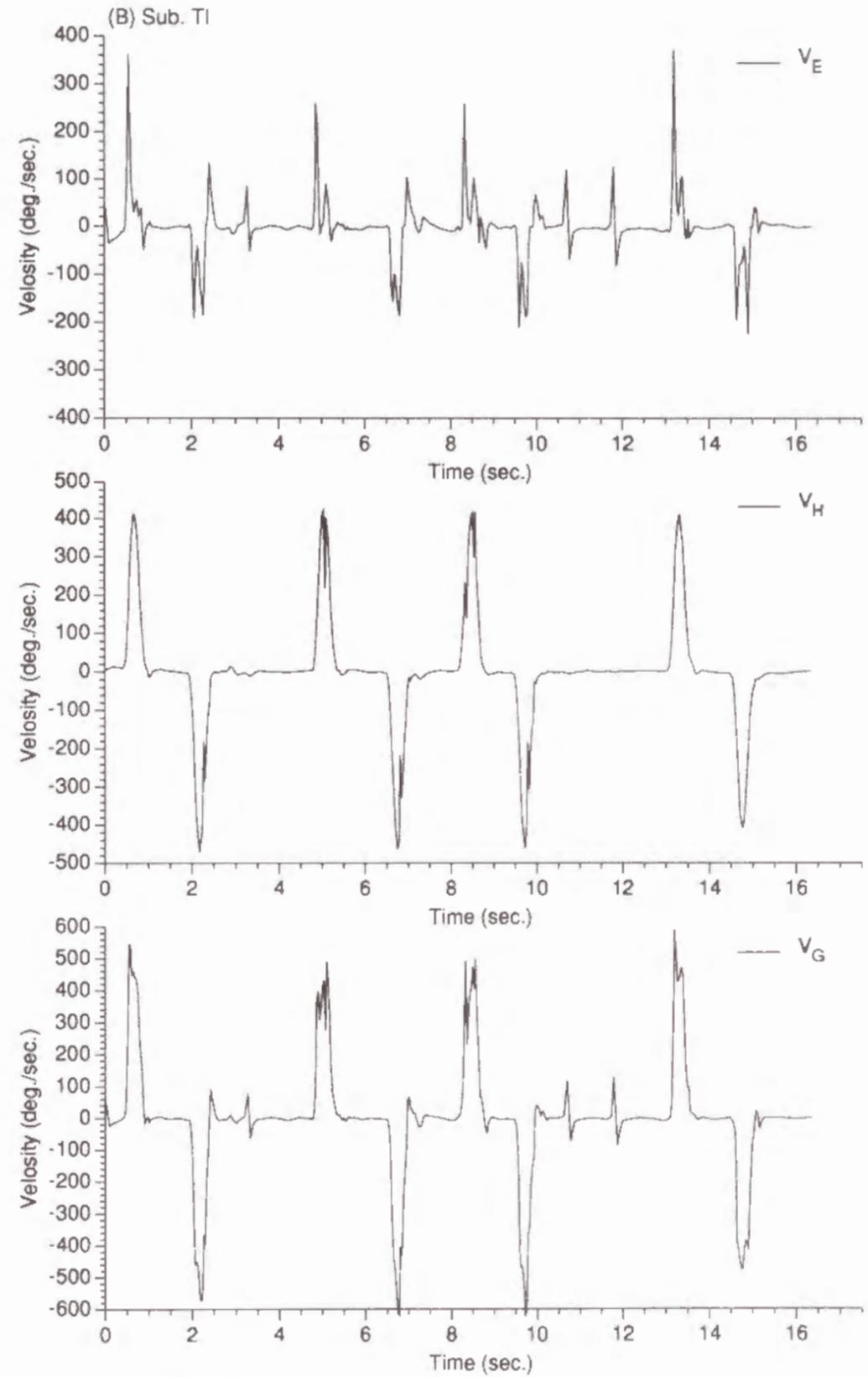
付図 A-16(A) 刺激間隔60°での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。  
被験者HS。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。



付図 A-16(B) 刺激間隔60°での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。  
被験者TI。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。



付図 A-17(A) 刺激間隔120°での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。  
被験者HS。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。



付図 A-17(B) 刺激間隔120°での等色中の眼球 $V_E$ と頭部 $V_H$ の回転速度および視点移動速度 $V_G$ 。  
被験者TI。上段： $V_E$ 、中段： $V_H$ 、下段： $V_G$ 。