

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	短期記憶に基づく視覚の波長弁別能に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	内川恵二
Author(English)	KEIJI UCHIKAWA
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第1192号, 授与年月日:1980年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: , Report number:甲第1192号, Conferred date:1980/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

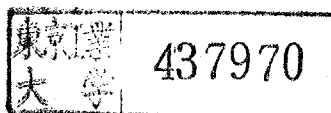
短期記憶に基づく

視覚の波長弁別能に関する研究

昭和55年1月

指導教官 池田光男教授

提出者 東京工業大学 総合理工学研究科
物理情報工学専攻 博士課程
内川 恵二



目次

第1章 序論	1
1.1 視覚による色の弁別	1
1.2 継時的な色の比較	6
1.3 本研究の目的と概要	11
第2章 刺激呈示法と実験装置	14
2.1 継時波長弁別法	14
2.2 光学系	17
2.2.1 配置	17
2.2.2 測光とキャリブレーション	20
2.3 電気制御系	26
2.3.1 構成	26
2.3.2 回路と制御プログラム	29
第3章 継時波長弁別能の時間特性と波長特性	33
3.1 実験概要	33
3.2 被験者	34
3.3 明るさマッチング	35
3.3.1 方法	35
3.3.2 結果とその利用	37
3.4 実験I：継時波長弁別閾値の時間変化， $\Delta I-I$ 関数の測定	39
3.4.1 方法	39
3.4.2 結果	44
3.5 実験II：継時波長弁別関数， $\Delta I-I$ 関数の測定	79
3.5.1 方法	79

3.5.2 結果	82
3.6 実験総括	89
第4章 明るさの継時弁別	93
4.1 実験概要と方法	93
4.1.1 装置	93
4.1.2 手続	94
4.1.3 被験者	95
4.2 結果と考察	95
第5章 総合的考察	101
5.1 実験Iの考察	101
5.2 実験IIの考察	108
5.3 色の短期記憶	113
5.4 応用面からの検討	115
第6章 結論	119
謝辞	121
参考文献	122
関連論文 及び 学会講演	128
付録I 回路図	129
II 制御プログラム	132
III 実験プログラム	140
IV 累積正規分布曲線のおてはめ方	168
V 色覚モデルによる波長弁別関数の求め方	170

第1章 序論

1.1 視覚による色の弁別

人間の視覚情報処理系の中ですぐれた機能の一つに色覚がある。我々は数多くの色を弁別し認識することができ、外界から様々な情報を取り入れている。また、信号、道路標識あるいは発光ダイオード、カラーテレビなどといった様々な色表示装置を用いて色情報を作り出し、積極的に色覚を利用することにより生活を便利で豊かなものにしていく。人間の視覚系がどのくらいの色の差を検出できるかといった色弁別能の研究はこういった人間の色覚の特性を知り、そのメカニズムを探る上でも、また色差と均等に表わす色度系を確立するという応用面でも重要な意味があり、今までに活発になされてきた(Wright and Pitt, 1934; Wright, 1941; MacAdam, 1942; Brown and MacAdam, 1949; Siegel, 1962, 1963, 1964; Siegel and Dimmick, 1962; Wyszecki and Fielder, 1971; etc)

視覚による色の弁別能を調べるには、

Fig. 1.1 に示すような隣接した二つの部分よりなる、いわゆる二分視野(bipartite field)を用意し、一方の視野に色 C_1 、他方の視野に色 C_2 を呈示する。被験者(subject)が二つの視野の色の違いを知覚できる最小の色の差 ΔC を測定し、色弁別閾値とする方法が通常とられる。特に色相(hue)と彩度(saturation)というクロマティックネス(chromaticness)だけに注目する場合には、明るさ(brightness)の違いで弁別できないように、両視野の明るさを等しく合わせて実験を行う。視野の大きさ、網膜上の位置、輝度レベル、呈示持続時間等のパラメータは実験目的に合わせてその都度適当に選択される。



Fig. 1.1 二分視野。色 C_1 、 C_2 が併置して呈示される。

弁別閾値の決め方は j. n. d. (just noticeable difference の省略) を調整法(method of adjustment)、恒常法(constant stimuli method)

算で求める方法、あるいはカラーマッチング (color matching) を多数回行い、そのマッチング点のばらつきを標準偏差 (S.D., standard deviation) を ΔC とする方法がある。j. n. d. を調整法で求める方法は色の差を直接的に評価しているが、色がちょうど違って見えるという判断基準を一定にあることが容易ではなく、その点色の差が少しづつ異なる対を多数回呈示し、色が違って見えるか、そうでないかという応答をとる恒常法の方がより精度の高い信頼のあるデータが得られる (Siegel, 1962)。カラーマッチングによる方法は被験者の判断は容易であるが、各マッチング点では2色は同じに見えるわけでありマッチングの S.D. が色が違って見える最小の差を直接的に示していないという問題がある (Boynton, 1979)。そこで S.D. と j. n. d. との比較評価が必要となり MacAdam (1942) は S.D. の約3倍が j. n. d. に相当すると報告している。

波長弁別の場合にはあるテスト波長 λ_t と明るさを等しくした比較波長 λ_c を隣接して呈示し、その短波長側、長波長側の弁別閾値をそれぞれ測定し、二つを平均して波長 λ_t の弁別閾値 $\Delta\lambda$ とする場合が多い。このようにして求めた波長弁別閾値の一例として Wright and Pitt (1934) の実験結果を Fig. 1.2 に示す。実験は Wright (1927-1928) の色彩計 (colorimeter) を用

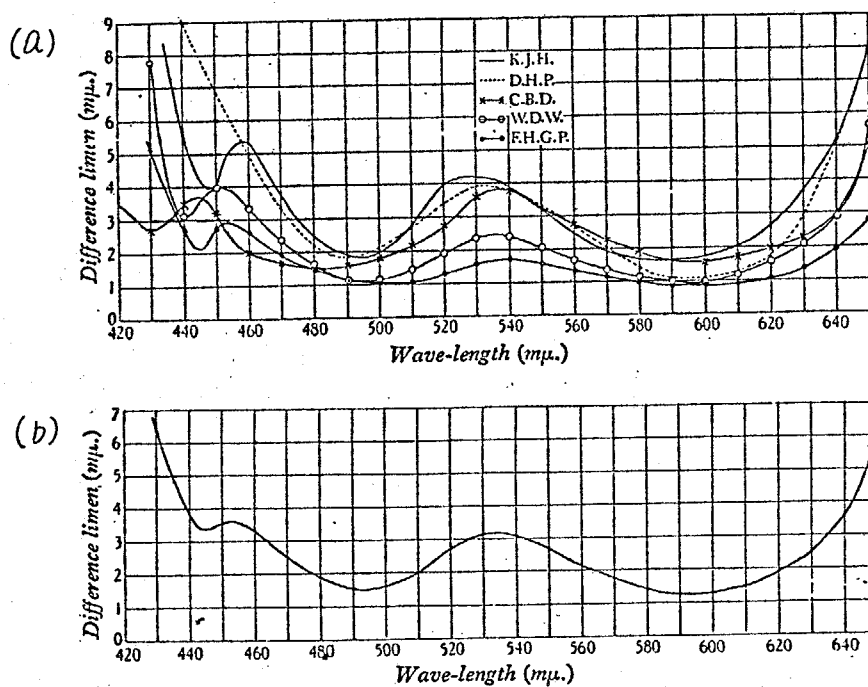


Fig. 1.2
波長弁別関数の一例。(a) 5人の被験者の結果。(b) 5人の被験者の平均値。(Wright and Pitt, 1934)。

11. 2° の二分視野を中心固視し、約70トロランド(td)の明るさレベルの連続呈示の条件で行なわれている。Fig. 1.2 (a)には5人の被験者の結果が示されており、被験者により弁別閾値の大きさは多少異なるが、どの被験者でも数nmの弁別閾値をもち、視覚系の波長弁別能が極めて良いことを示している。また各々の曲線は類似した形を示している。すなわち、600nmと490nm付近で極小値を持ち、また一人の被験者を除いて、440nm付近に第二のくぼみが見られている。さらに極大値が530nm付近と450nm付近にあり、波長の両端では弁別閾値は大きく増大していく。Fig. 1.2 (b)に5人の被験者の平均値を示す。ただし、460nm以下での短波長域では被験者間のばらつきが比較的大きいため、平均をとることは多少問題がある。

Fig. 1.2 (b)の波長弁別関数 (wavelength discrimination function) は視覚系の波長差に対する弁別の特性を表わす代表例として、よく用いられる

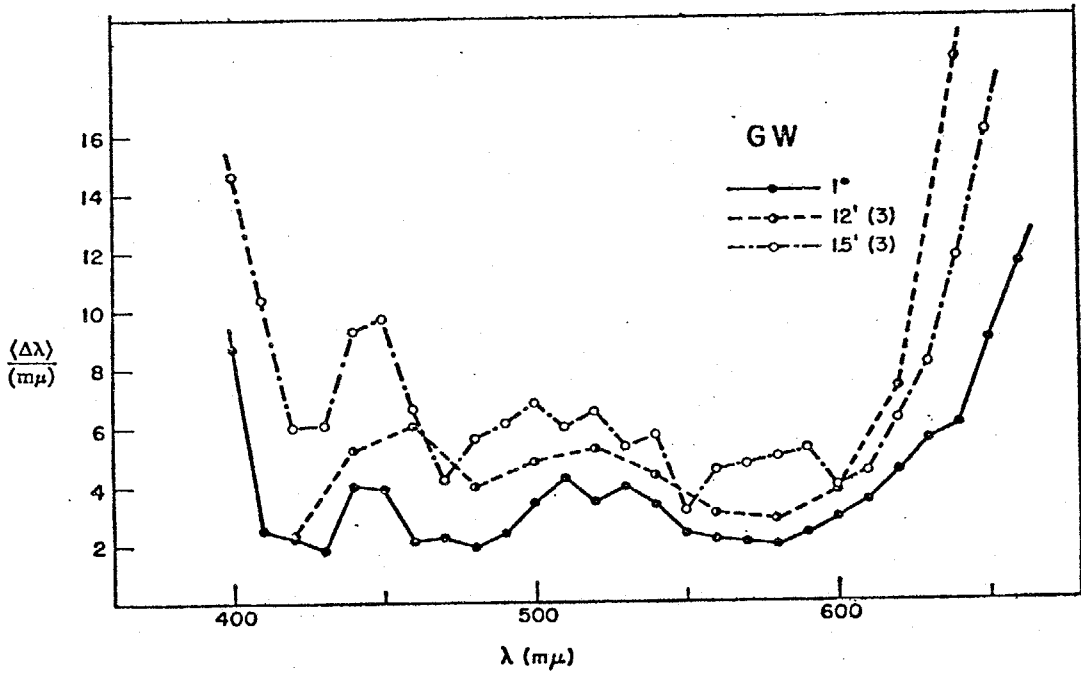


Fig. 1.3 小視野における波長弁別関数の変化。視野が狭くなるにつれて波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ (mμ) は増大する (Bedford and Wyszecki, 1958)。

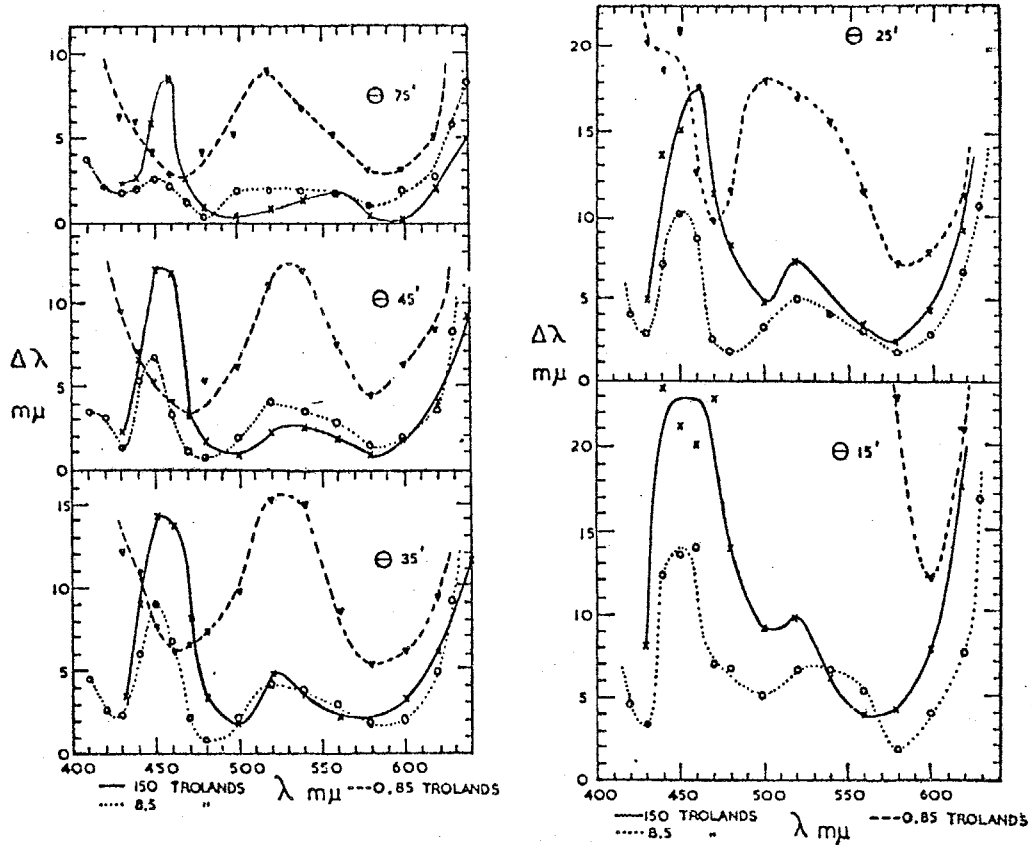


Fig. 1.4 小視野及び輝度レベルにおける波長弁別関数の変化。
 波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ ($m\mu$)は、視野を小さくすると青-緑領域で輝度レベルを下げるとほぼ520nm付近で増大が大きいの (McCree, 1960(b))

ものであるが、波長弁別関数はその大きさも形も、刺激呈示の条件や観察条件によって、大きく変化することが他の多くの実験により明らかにされている (Wright, 1945; Weale, 1951, 1953; Bedford and Wyszecki, 1958; McCree, 1960 (a) (b))。Fig. 1.3 ~ 1.5 に実験パラメータによる波長弁別関数の変化の例をいくつか示す。Bedford and Wyszecki (1958) は視野の大きさ σ に 1° , $12'$, $1.5'$ の3段階をとり、波長弁別関数をもとめた。 1° の視野の結果は Fig. 1.2 (b) とほぼ同様であるが、 $12'$, $1.5'$ の視野の弁別閾値は 1° のもの比べると増大し、弁別が劣化することが示された (Fig. 1.3)。

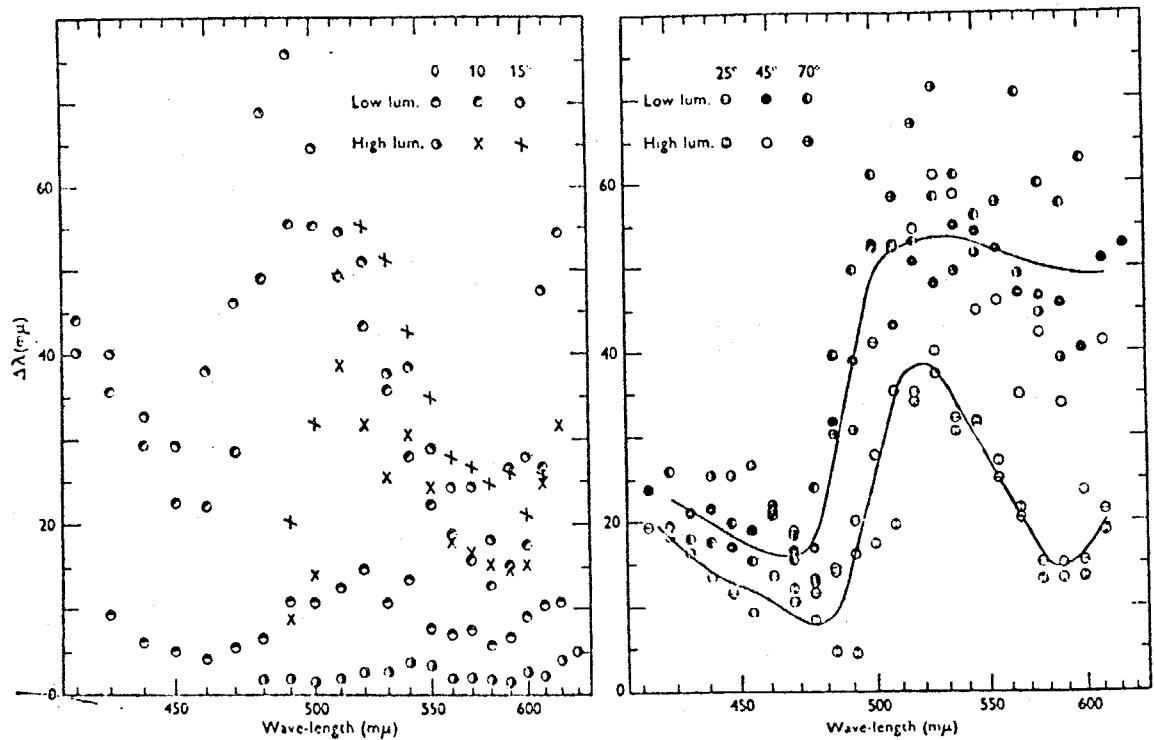


Fig. 1.5 網膜周辺における波長弁別閾値の変化。0°から15°までは、ほぼ全波長域で 25°以上では特に緑から赤領域で波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ (m μ) は増大する (Weale, 1951, 1953)。

McCree (1960b) は視野を 15' から 75' まで変化させ、輝度レベルも 0.85, 8.5, 150 td の 3 段階を履き、波長弁別閾値を測定した。視野の大きさを減少すると、特に青-緑領域で弁別閾値は大きく増大し、弁別閾値は第三色覚異常者 (tritanope) の特徴を示す傾向になった。さらに輝度レベルを下げると特に 520nm 付近の中波長領域で弁別閾値が大きく増大し、450nm 付近では逆に減少する傾向がみられた (Fig. 1.4)。McCree (1960a) は 80' のテスト視野を用い、これを強く固視すると波長弁別閾値が極端に増大することを示し、固視条件によって波長弁別能が変化するという Bedford and Wyszecki (1958) の指適を確認した。これは小視野でしかもテスト視野と比較視野の間隔が小さいと、被験者は視野全体を凝視することになり、刺激が静止網膜像

(stabilized retinal image) と同様になってしまうからであると考えられる。網膜上の位置と波長弁別関数の関係は Weale (1951, 1953) が視角 0° から 70° までの範囲で調べ、 0° から 15° までには各波長で弁別閾値は大きく増大していき、 25° 以上では特に緑から赤領域での弁別が劣化するということを報告している (Fig. 1.5)。Siegel (1965) は刺激の呈示時間と波長弁別能の関係を 575nm のテスト波長を用いて調べ、呈示時間が 5.0sec から 0.02sec まで次第に短くなると弁別感度も低下していくという結果を得た。

以上見てきたように波長弁別関数は刺激呈示のパラメータに大きく依存し、その値、形状が変化する。そこには当然、色覚のメカニズムの働きが反映しており、波長の差に対する視覚系の感度が決して一定ではなく対象物の形状や周囲の条件、対象物をどう見るかにより大きく異なることを表わすものである。そこで、実際面で色の差を取り扱う場合には、様々なパラメータを十分に考慮に入れて実際の場合に即した実験データを応用することが重要になってくる。

1.2 継時的な色の比較

人間の視覚系には前節で述べたように優秀な色弁別機能が備わっており、我々は日常生活において、極めてたやすく周囲に存在する色を比較し弁別している。ところがこのような実際面での我々の色情報の取り入れ方を考えてみると、必ずしも併置された2色を比較しているわけではなく継時的に (successively) 色を比較している場合の方が多々ことに気付く。例えば、道路標識、信号あるいは駅の案内板等の色から情報を知るには以前に見た色と今見ている色との継時的な色の比較を行なっていることになる。また手元にあるカラー写真の色とそれを撮影した時の対象物の色と比較する場合も同様なことがいえる。またカラーテレビの色の良否を判断するような場合には、事物の形、概念と密接に結びついた色、いわゆる記憶色 (memory color) が基準にな

るが、これも一種の継時的な色の比較に他ならない。これ以外にもまだ多くの例が上げられるが、これらのことから言えることは、我々は日常的な活動において色を継時的に比較する機会が実に多いということである。

さて、以上は比較的長い時間幅のある継時的な色の比較の例であるが、次のような短い時間幅をもつ、継時的な色の比較の例もあげられる。空間的に離れた2色を比較あることを考えてみるとまず第一の色を見て、次に眼球あるいは頭を動かすことにより、注視点を移動させて、第二の色を見る。2色が同時に目前に存在していても色弁別能力の高い中心窩で2色を共にとらえることができなければ、このように我々は継時的な色の比較を行なっている。ある1点を見てから他の1点を見るまでの注視点の移動時間は数百msecというオーダーであるからこの場合は実に時間幅の短い継時的な色の比較になっているといえる。実際には工業上の製品の色彩管理などにこのような例は多く見られる。例えば服飾デザイナーはマンセル色票(Munsell hue chip)といった数多くの色見本の中からまず自分の欲しい色を選び出し、次にその色と実際の着地の色とを上述した方法で見比べることによって、着地の現状を知る。また、製品の品質検査にも色が用いられ、例えば焼き上がったパンの色と基準となる色票の色とを同様に見比べて、一定基準内の色を持つパンだけを市場に出荷するようにしている場合もある。以上の二例のような製品の色彩管理という面では特に色差の小さい2色の継時的な比較を行っており、継時的な比較による色差が同時比較の場合とどう異っているかは重大な問題となってくると考えられる。継時的な色の比較をするためには、次の色が視覚系に入力されるまでの間、先に入力された色は何らかの形で視覚系に記憶されている必要がある。したがって継時的な色の比較は記憶を用いた色の比較と言い換えることができよう。

継時的な色の比較が行われる場合は視覚系の色弁別能は2色を並べて同時に比較ある場合に比べて変化あるであろうか。もし色の情報が記憶の中で失なわれるものであれば、その消失に伴い、色の弁別能も劣化していくであろう。継時的な色の比較は日常生活においてはむしろ一般的であり、さらに記憶の働き

によると考えられるため、継時比較における色の弁別を調べることは前述したように、実用面でもまた高次のレベルの色覚メカニズムを考える上でも重要なものとなる。

色の継時的な比較あるいは色の記憶 (memory for color) に関する研究は長い時間の記憶を取ったものには多くの研究がありデータも豊富である (Bruner et al., 1951; Harper, 1953; Baker and Mackintosh, 1955; Bartleson, 1960; Delk and Fillenbaum, 1965)。ただし、記憶色の問題は視覚系だけの問題にとどまらず、大脳の高次レベルまでが関与することになり、現在でも明解な説明はなかなか困難である。数百 msec という短い時間の色の記憶を取った研究は全くなく、数十 sec から数 min というオーダーではいくつかの研究がある。古くには Collins (1931-32) がモノプロメータを用い色相について、Hanawalt and Post (1942) が色票、色円板を使い彩度についての簡単な記憶の実験を継時比較により行ない、色相はわおかにシフトあるが、彩度は変化しないことを報告した。しかし、これらの研究では記憶による色弁別能の変化については明らかにされていない。

Burnham and Clark (1954, 1955) はカラー適性検査の一つとして色相の記憶検査法を開発した。それは Farnsworth-Munsell の 100 色相シリーズの中から等間隔の色差で 20 個のテスト用色票と 43 個の比較用色票を選び出し、同心円上にテスト色票 (内側)、比較色票 (外側) を並べ、被験者はまおあるテスト色票を見て、数秒後比較色票の中から同じ色相と思われるものを選び出すというものである。もちろんテスト色票は 1 回だけしか見られない。比較色票の中にはテスト色票と同一の色票、およびそれに近い色相の色票が含まれている。被験者がテスト色票の色を正確に記憶していれば、比較色票の中から確実にテスト色票と同一のものを選び出すであろうし、記憶が不正確になれば誤りが増えであろう。Fig. 1.6 に結果の一例を示す。極軸は、赤、黄、緑の色相順を正方向として、比較色票とテスト色票の差をステップで表わしてある。2 ステップが約 2.2 マンセル色相ステップに相当する。縦軸

は応答の頻度で、黒丸が被験者が選んだ比較色票の分布を示している。この結果は20個おべての色票について、130人の被験者の結果をまとめ合計したものである。比較色票はテスト色票と同一のものが最も多く選ばれ、比較色票がテスト色票よりも両方向に離れるにつれて選ばれる割合は次第に減少していくが、かなりの幅をもって中心の両側に分布している。分布の標準偏差は2.8ステップとなっている。被験者がテスト色票と比較色票を併置して同時に比較すると誤りなく同一の色票を選び出せることから、その分布はFig. 1.6の破線で示すよう

になると考えられる。したがって黒丸の分布の幅の広がりには記憶の交差ということになり、色相を継時比較すると同時比較に比べてマッチングのばらつきが増大する、すなわち弁別能が劣化することが認められる。

Newhall et al. (1957)は色彩計を用いて、色の同時と継時のマッチングを行ない、色相だけでなくクロマ(chroma)とバリュー(value)についての変化も同時に測定した。テスト刺激としては25個のマンセル色票を用いた。同時マッチングの場合は2°の正方形のマッチング視野の左半分にはテスト色票が、右半分には色彩計からの比較色光が呈示され、被験者は比較色光をテスト色票の色にマッチングする。継時マッチングの場合は全マッチング視野にま

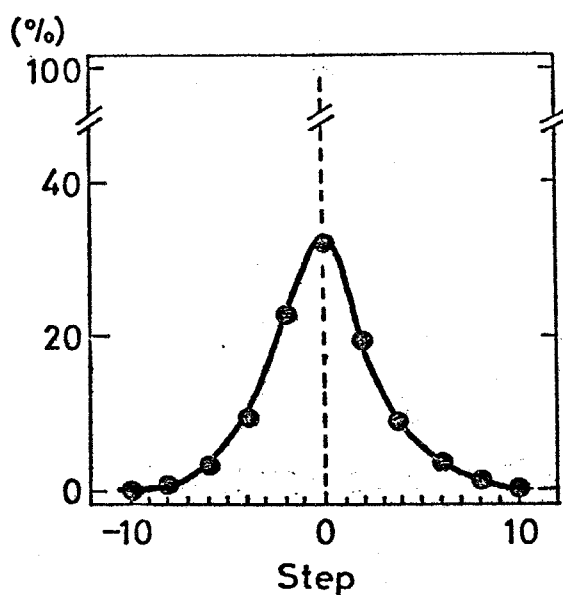


Fig. 1.6 被験者が選んだ比較色票の分布。横軸は比較色票とテスト色票の差を表し、2ステップは22マンセルステップに相当する。縦軸は応答の割合を示す (Burnham and Clark, 1955)。

テスト色票が5秒間呈示され、次に5秒間が経過した後にマッチング視野が比較色光に置き換わり、被験者は記憶内のテスト色票の色とのマッチングを開始する。同時、継時マッチング共に特にマッチング時間は制限されていない。マッチング点のばらつきを MacAdam (1942) の方法と同様に CIE xy 色度図上に楕円で表わしたのが Fig. 1.7 である。(a) が同時、(b) が継時マッチングの結果である。図中の番号が用いた色を表わし、各楕円の中心点がマッチングの平均値である。楕円は 39% のマッチング点が含まれる範囲を表わす。Fig. 1.7 (a), (b) を比較すると継時マッチングの楕円の面積は平均ありと同時マッチングのもの約 6.2 倍になっており、継時マッチングのばらつきの方が同時マッチングのばらつきよりも大きいことが明らかである。したがって、

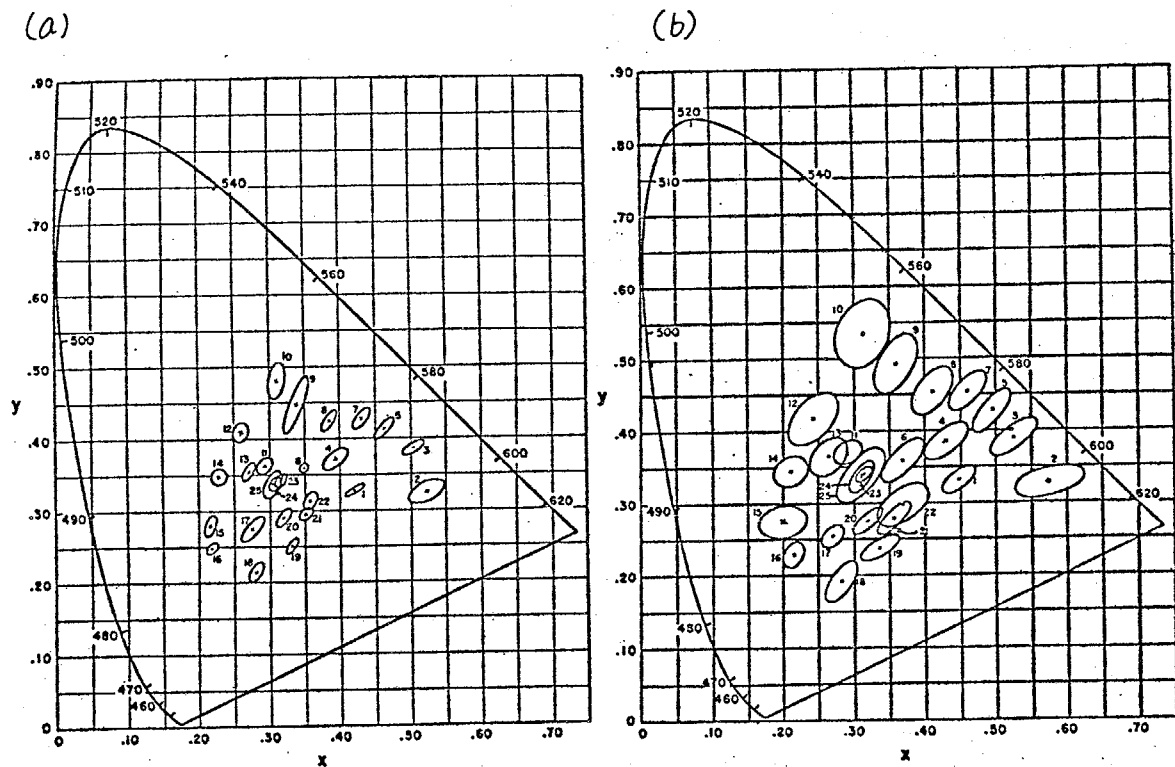


Fig. 1.7 (a) 色の同時マッチング, (b) 色の継時マッチングのばらつきを示す楕円。継時マッチングの方がばらつきの範囲が大きい (Newhall et al., 1957)。

ここでも色を継時比較すると小さい色の差が弁別できなくなるとなる。すなわち色弁別能が劣化することが示されている。

以上述べた Burnham and Clark (1954, 1955) と Newhall et al. (1957) の研究により継時比較による色弁別能の劣化は存在することが明らかとなったが、これらの研究ではマッチング法を用いているため第一にテスト刺激の呈示から比較刺激が呈示され被験者が判断するまでの時間隔が正確に決められず、第二に短い時間隔での測定が不可能となる。そのために色弁別能の比較の時間遅れに伴う変化特性は明確にされていない。

von Wright (1968), Clark (1969), Dick (1969), Coltheart et al. (1974), Banks and Barber (1977) らは、赤、緑、黄あるいは黒といった色のついた文字や図がマトリクス状に配置された刺激を用い、部分報告法 (partial report technique) (Sperling, 1960) により色情報が短期記憶 (visual information storage あるいは iconic storage) 内においてどのような時間経過で失われていくかを調べた。結果として色も文字と同様に刺激の一属性として短期記憶内で有効な情報であり特に色情報だけが失われることはないと報告している。しかし、これらの実験では、使用した刺激間の色差が非常に大きいため、短期記憶内で多少色情報が失われ、色弁別能が劣化しても結果には現われないと考えられる。したがって、これらの研究からも色弁別能の劣化の時間特性が明らかにされていないことになる。

1.3 本研究の目的と概要

前節まで述べたように、視覚の色弁別能は対象物の観測条件によって大きく異なり、色の継時比較の場合も通常の同時比較に比べて色弁別能は劣化することが示された。しかし、継時比較における色弁別能の研究は数が少なく、今迄充分に行なわれているとは言えない状況にある。さらに、どのような時間

特性で継時比較の色弁別能が劣化していくかという点に関しては全く明らかとなっていない。色の継時比較は日常生活上でも工業的にも頻繁に用いられているだけにこれを調べることは応用的価値のある重要な視覚系の特性を明らかにし、さらに色覚の記憶特性を知る上でも意味のあるデータを与えることになると考えられる。そこで本研究では継時比較による波長弁別能が同時比較の場合に比べてどのくらいの時間内でどの程度劣化するかを精度良く測定し、色の記憶の時間特性を調べることによってそのような工業上の必要なデータを与えると共に色覚の記憶メカニズムの究明に役立つ資料を得ることを目的とする。

今までになぜこのような重要なデータが得られなかったかを考えてみると、このような実験を可能にする良い方法が得られなかったことが一つの理由としてあげられる。前述したように測定の比較的容易なカラーマッチング法では特に短い時間遅れでの継時的な色の比較が不可能であった。そこでもし恒常法を用いるとすると、各試行毎にテスト波長 λ_t と比較波長 λ_c を比較することになり、その点時間遅れを自由に選べるという利点はある。しかし λ_c を各試行毎に変化させること、さらに λ_t と λ_c を等明るさで呈示するためにはやはり各試行毎に λ_c の光の強度も視覚の明るさ分光感度に合わせて調整することが必要となってくる。しかも恒常法ではこれを何百回と繰り返して、はじめで1つの λ_t に対する波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ が求まるわけであり人間が手動で実験を行なうとすると刺激のセットに時間がかかりすぎ、自動化なしでは実質上は実験が不可能ということになる。そこで、本研究では2刺激波長の比較の時間遅れを正確に決めるために特に継時波長弁別法とでもいうべき新しい方法を開発し、そのために装置として電子計算機制御の光学系を製作し、この方法の実現を可能にした。また本研究では補足実験として明るさの継時弁別実験も行ない、色の場合と比較した。本研究で採用した明るさレベル、視野の大きさ、網膜上の位置といった呈示条件及び観察方法は、1.2節で述べたような波長弁別能の劣化がこれらの条件によって起こらないように考慮し決定した。

本論文は第6章から構成され、第1章では本研究の背景及び目的等を述べ、

第2章で方法及び装置について述べる。第3章では継時波長弁別閾値の測定実験について述べる。まず実験Iで2刺激の呈示時間遅れに伴う波長弁別閾値の変化を5波長について詳しく測定し、次に実験IIで波長を全可視域に広げ波長弁別閾値を10nmおきに細かく測定した。第4章では明るさの継時弁別の実験について述べ、第5章では実験の考察を行い、さらに色の記憶のメカニズムについて考え求められた弁別特性の応用的意味を検討する。最後に第6章で結論を述べる。実験用プログラム例およびデータ整理の具体的な方法等については付録で説明するようにした。

第2章 刺激呈示法と実験装置

2.1 継時波長弁別法

色の継時比較を調べたこれまでの研究では、1.2節で述べたように、テスト色1回きりの呈示後、比較色をマッチングするという方法を用いていたために (Collins, 1931-32; Burnham and Clark, 1954, 1955; Newhall et al., 1957) 継時的な色弁別能の時間変化を測定することは不可能であった。この時間的な変化を調べるためにはテスト刺激と比較刺激を毎回、対にして呈示し、その度ごとに被験者が比較判断することが必要である。そこで、本研究では各試行毎に二つの波長と時間的な遅れを持たせて呈示し、被験者にその2色と比較させるという方法を用いた。ここではこれを継時波長弁別法と呼ぶことにある。

Fig. 2.1の上図に示すようにテスト波長 λ_t 、比較波長 λ_c がそれぞれ二分視野の右、左に刺激として呈示される。刺激呈示の時間条件と刺激が呈示されているようすはFig. 2.1の下図に示されている。まず、テスト刺激がある呈示持続時間 D (duration)だけ呈示され、次に呈示開始時間遅れ SOA (Stimulus onset asynchrony)をもって比較刺激が等しい D で呈示される。被験者は2刺激の呈示後直ちに2色の比較判断をする。 $SOA = 0$ msec ならば2刺激は同時呈示となり、 SOA が次第に増加するに伴い、時間的に分離して呈示となっていく。したがって SOA の大きさを増減することにより色の比較を同時あるいは継時と簡単に行なうことができる。

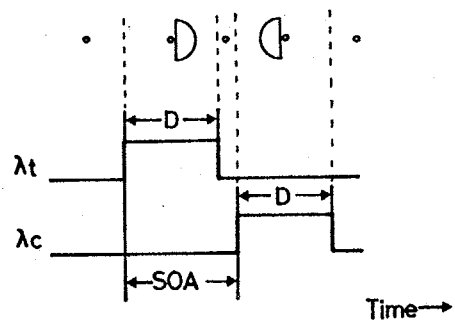
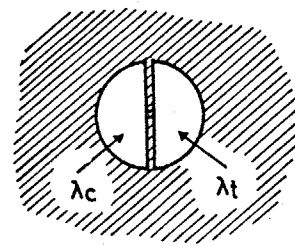


Fig. 2.1 刺激呈示の視野と時間条件。 λ_t : テスト波長, λ_c : 比較波長, D : 呈示持続時間, SOA : 呈示開始時間遅れ

ここで用いた視野は Fig. 2.1 上図に示されるような二分視野であり、中心窩での隣接した位置に2刺激が呈示される。応用的立場から考えると実際の色の比較と同様に2刺激を中心窩の同じ位置に呈示し、比較するのが好ましいが、残効 (after effect) による影響、および $SOA = 0 \text{ sec}$ の場合に2刺激の比較ができないことなどから、ここでは二分視野を用いることにした。

本方法はテスト刺激と比較刺激を各試行毎に比較するため、テスト刺激も繰り返し呈示されることになる。テスト刺激として同じ波長を続けて多数回呈示すると、被験者はその波長の色を学習し正確に記憶してしまい、比較刺激を見ただけで、差が判断できてしまうというおそれが生じる。各試行毎にテスト刺激と比較刺激を比べて判断することにより、このみ、時間経過に伴う継時的波長弁別能の変化は測定できる。そこで本方法では偽テスト刺激 (dummy stimulus) (以下ダミー刺激と呼ぶ) として、 λ_7 の周辺の波長域から数個の刺激を選び、試行によりはこれらのダミー刺激をテスト刺激と置き換えて呈示するようにした。こうすることで、テスト刺激に対する学習効果を妨げ、さらに比較刺激を見ただけでは判断が不可能になるようにすることがねらいである。

Fig. 2.2 はダミー刺激の波長 λ_d の選び方を説明するための図で、最上段の軸には波長が番号で順番に目盛っており、T軸はテスト波長 λ_7 を示す軸で、ここでは λ_8 を λ_7 として選んである。軸上の付点の範囲は λ_7 に対して弁別ができるまでの波長範囲を表わし、境界線が弁別閾値を与えるものとある。D₁ から D₄ 軸には各ダミー波長 λ_{d1} , λ_{d2} , λ_{d3} , λ_{d4} に対してその位置と弁別範囲が同様に示されている。もしダミー波長をテスト波長から大きく離れた位置に選ぶと被験者はテストとダミー波長、それぞれの色を別々に容易に記憶してしまうことになり、もしまた近すぎる位置に選ぶと、ダミー波長の色とテスト波長の色が同じものになり、いずれの場合でもダミー刺激を入れる効果がなくなると考えられる。そこで Fig. 2.2 に示す位置にダミー波長を選ぶと、 λ_7 に対して例えば λ_5 を比較波長にとると、両者は弁別できるが、

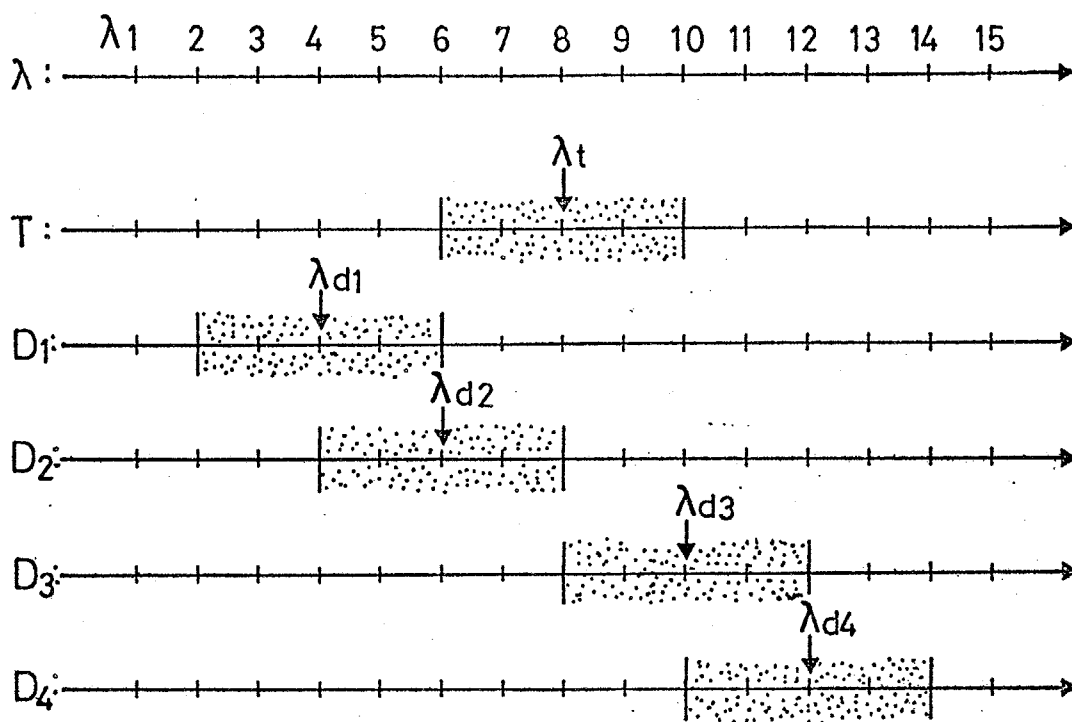


Fig. 2.2 ダミー波長の並び方。最上段の軸には波長が番号で目盛っている。TからD4軸はそれぞれテスト波長(λ_t)、ダミー波長($\lambda_{d1} \sim \lambda_{d4}$)に対応する軸で、付点の領域は、弁別ができるまでの、波長範囲を表わしている。

λ_{d1} , λ_{d2} に対しては λ_5 は弁別できないことになる。また、 λ_t に対しては弁別できない範囲にある λ_9 を比較波長にとると、 λ_{d1} , λ_{d2} , λ_{d4} に対しては弁別でき、 λ_{d3} に対しては弁別できないことになる。このように同一の比較刺激に対して、テスト刺激では弁別できるが、ダミー刺激では弁別できない、あるいはその逆ということになり、被験者は各試行毎に両視野の刺激を比較しなければ正しい応答ができなくなる。そこで、ダミー刺激を入れる効果が発揮されるというわけである。この場合ダミー波長の色とテスト波長の色が近いためそれぞれの色を別々に学習することは容易ではなく、ほとんど不可能となる。これは実験後の内観報告からも確かめられた。また、ダミー刺激の応

答結果を見ることで、被験者が比較判教だけによって応答していないかどうかのチェックも可能となる。

2.2 光学系

2.2.1 配置

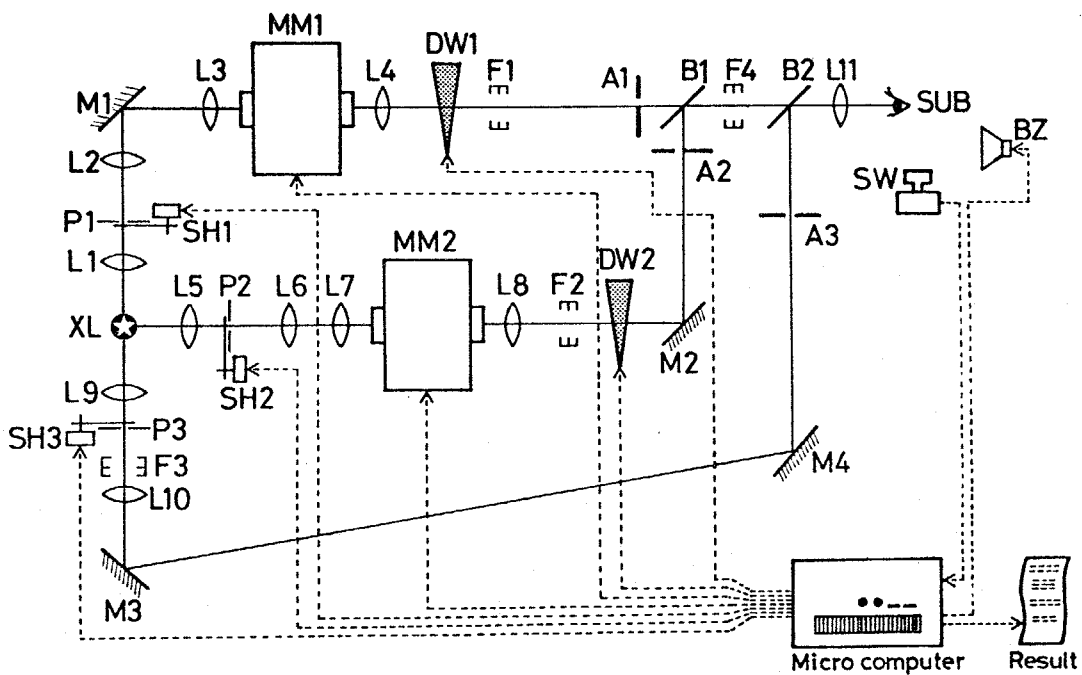


Fig. 2.3 装置図。光学系及び電気制御系を示す。光学系は3光路のマックスウェル視系で構成されている。モノクロメータ、ウェッジ、シャッター等は電子計算機で制御される。

光学系は Fig. 2.3 に示すように標準的な3光路のマックスウェル視系* (Maxwellian view system) である。光源XLは500Wのキセノンランプでそこから光束は3方向に分かれる。図の上方に向う光路(光路I)と

*マックスウェル視系の説明は例えば池田(1975)を参照。

右方向に向う光路(光路Ⅱ)とは同等のものであるから、まず光路Ⅰのみを例にとって説明する。光源のアーフの寸法はおよそ幅1.4mm, 長さ3.5mmであり、レンズL1により約 $\frac{1}{2}$ の縮小像がピンホールP1上に結ばれる。P1の直径は2mmあり、光源像の中で最も輝度の高い部分が中心になるように位置を調整してある。高速電磁シャッターSH1はP1の直前に置かれ羽根が往復運動することによって光路を開閉する。シャッターの羽根は幅が7mm, ストロークの振幅が2.5mmであり、光束をすばやく完全にカットすることができる。レンズL2により光束は平行光にされ、表面鏡M1で直角に曲げられ、レンズL3によりモノクロメータMM1の入射スリット上に集光する。モノクロメータはグレーティング型(NIKON, G-250)で入射スリット, 出射スリット共に長さ4mm, 幅0.5mmに調整した。そのため出射する単色光の半値幅は約3nmである。モノクロメータMM1からの単色光はレンズL4により再び平行光となり円形くさび型中性濃度フィルターDW1(以下ウエッジと略記する)を通過する。ウエッジDW1は回転することによって透過光の強度が最大約4 log unitの幅で対数的に変化するように作られている。アパーチャーA1は直径7mmの半円のパターンで被験者が観測する二分視野の右半分を形成している。ここまでは、光路Ⅱも全く同等である。ただし、アパーチャーA2は二分視野の左半分を形成する。

ビーム・スプリッターB1で光路Ⅰ, Ⅱが合成され、マックスウェルレンズL11により光束は被験者の右眼の瞳孔上に集光する。アパーチャーA1, A2は被験者が無限遠を見ている状態で眼のピントが合うようにレンズL11に関して瞳孔とほぼ共役の位置に置かれ、被験者の眼の疲労を少なくしている。光路Ⅰ, ⅡのF1, F2, F4はフィルター・ホルダーである。ここに色温度変換フィルターを入れることによりモノクロメータの0次回折光を補正し白色光を作り出すことができる。

光源XLから下方に向う光路(光路Ⅲ)は固視点呈示用のもので、光路Ⅰ, Ⅱと同様にシャッターSH3により光路の開閉ができる。固視点は直径0.65

mmの円形アパーチャーA3により作られ、そこから光束はビーム・スプリッターB2により光路Ⅰ、Ⅱと合成される。固視点の明るさはフィルター・ホルダーF3にNDフィルターを挿入することで調整した。光源XLとレンズL1、L5、L9の間には熱吸収フィルターを入れ、特に赤外光をカットするようにした。

固視点呈示方法は実験の後半ではFig. 2.4に示すように多少変更した。これは光路Ⅲを本実験とは関係のない他の目的で使うために行なったものである。アパーチャーA3の直後に豆ランプを置いて固視点を作り、被験者はビーム・スプリッターB3、B2およびマックスウェルレンズL11を通して固視点を自然視する。A3はFig. 2.3のアパーチャーと全く同じものであり、L11からの距離も等しくとってある。また、豆ランプの前には色温度変換フィルター等を数枚重ね、固視点の色も明るさもFig. 2.3の場合とほぼ等しくなるように合わせてある。もちろん光路ⅢはシャッターS13によって閉じるとともに、底へい枝STで迷走光(stray light)の入ることも防いでいる。したがって、固視点の見えに関しては全く変化なく、他の光路へ与える影響も無いといえる。

視野の大きさはFig. 2.5に示すように左右の視野共に視角にして高さ 2° 、幅 1° である。左右の視野の間隔は実験により $11'$ 、 $41'$ のどちらかの値をとるようにした。したがって、全視野の幅 d は $2^\circ 11'$ または $2^\circ 41'$ となる。

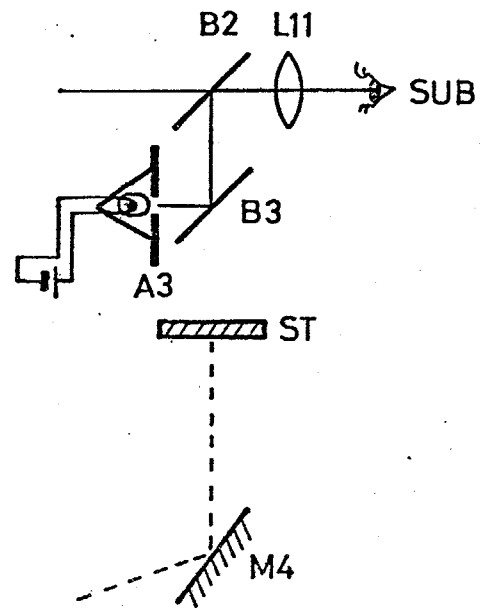
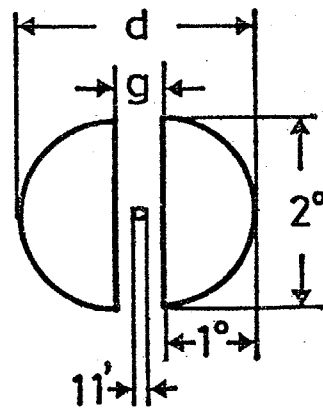


Fig. 2.4 固視点呈示用の光路Ⅲから、豆ランプによる自然視系に変更した。

Fig. 2.5 刺激呈示用パターン。左右の視野は高さ 2° 、幅 1° で左右の視野の間隔 g は $11'$ あるいは $41'$ とした。固視点は中央に $11'$ の大きさで呈示される。



固視点は図の小白丸で示すように左右の視野の中央に視角 $11'$ の大きさで呈示される。両視野の間隔を変化させた理由は実験の章で述べることにする。

2.2.2 測光 及び キャリブレーション

[シャッターの開閉応答時間の測定]

シャッター開閉応答時間の測定は Fig. 2.6 に示すようにフォト・トランジスタをシャッター後部の光束内に置き、シャッターへの入力パルスと、フォト・トランジスタからの出力パルスの信号と比較して行なった。フォト・トランジスタの入出力応答の線形の範囲を用いるために最大出力電圧値が $1.0V$ 以下となるように特に注意した。Fig. 2.7 で表わすようにシャッターの立上り、立下りの反応遅れ時間をそれぞれ T_1, T_2 とし、立上り、立下り時間をそれぞれ D_1, D_2 とある。測定結果は各シャッター毎に Table 2.1 に示す。3個のシャッター共に反応遅れ時間は $3\sim 4\text{ msec}$ 、立上り、立下り時間は、 1 msec 以下であり、数百 msec といった刺激呈示持続時間を与えるには、これらは十分に小さい値であると考えられる。SH1とSH2において T_1 に 1.4 msec の差があるが、差は僅かであるためSOAを決める際に特に補正は加えないことにした。

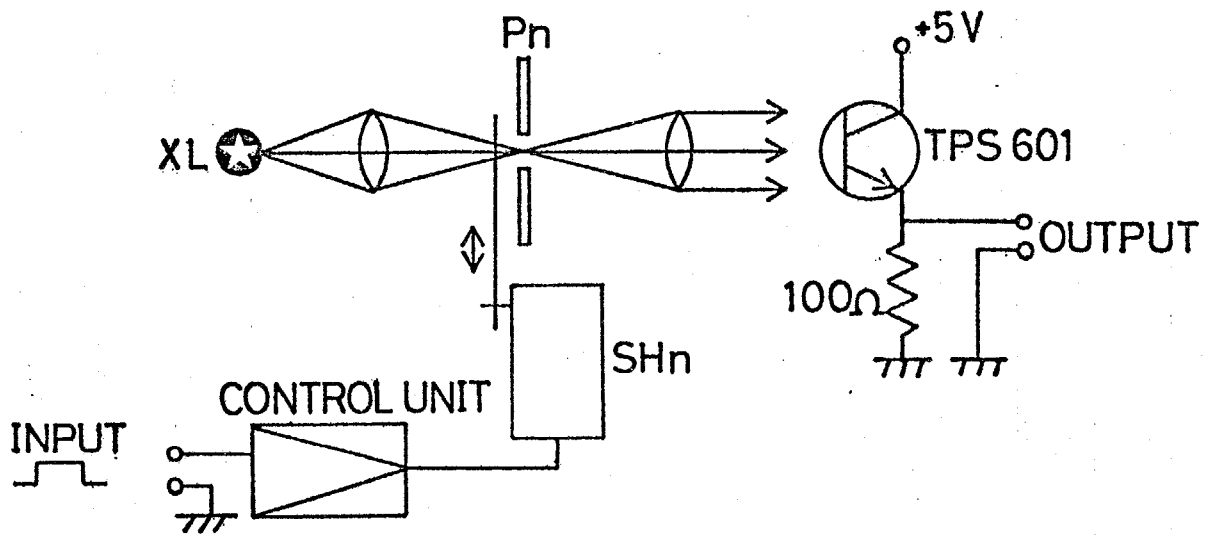


Fig. 2.6 シャッターの開閉応答時間の測定構成図。SH n ($n=1,2,3$) に矩形波の入力を与え、シャッターのブレードの動きをフォト・トランジスタの出力波形により測定する。

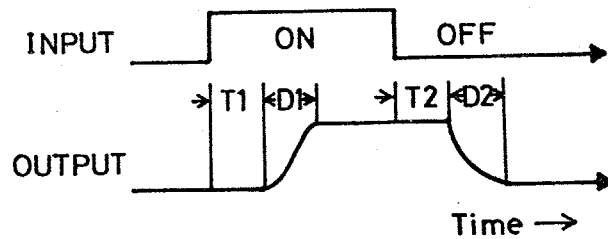


Fig. 2.7 シャッターへの入力パルスとフォト・トランジスタからの出力波形

Table 2.1 シャッターSH1,2,3 に対する応答遅延時間 T_1 , T_2 と立上り、立下り時間 $D1$, $D2$ の測定結果。

	(msec)			
	T_1	T_2	$D1$	$D2$
SH1	3.0	3.0	0.6	0.8
SH2	4.4	3.0	0.4	0.5
SH3	4.2	3.5	0.15	0.4

[ウエッジの濃度変化]

ウエッジ DW1, DW2 それぞれの濃度変化を波長 400~700 nm の範囲で 50nm おきに測定した。測定方法はまず、Fig. 2.3 の被験者 SUB の位置に放射計 (EG & G, モデル 550) の光検出部を置き、光束が中心部分に入射するようにする。次にモノクロメータ、MM1 あるいは MM2 を測定する波長にセットし、ウエッジ DW1 あるいは DW2 を回転させ、測光器の出力を直接ナノアンペア (namp) の単位で読む。実験室を完全暗室にして測光を行ない、 stray light の影響を除くように特に注意した。

測定結果の一例として、DW1, 550 nm の濃度変化を Fig. 2.8 に示す。横軸がウエッジの目盛で、回転角度に相当し、0 点は実際のウエッジ濃度が最小の

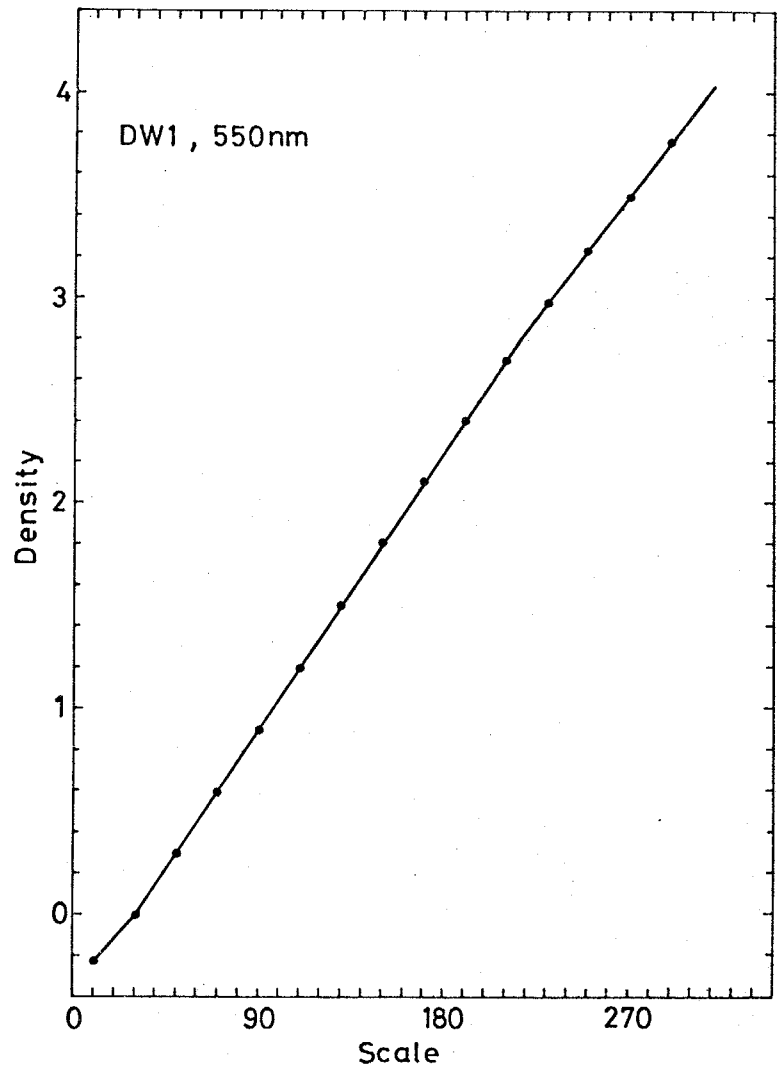


Fig. 2.8 ウエッジの濃度変化の一例。ウエッジ1 (DW1) を 550 nm の波長で測定した結果を示す。横軸はウエッジの目盛で回転角度に相当している。縦軸は相対濃度を示す。

部分と最大の部分との境界線の位置になっている。縦軸は濃度の相対値を示し、目盛30を0としてある。測定は目盛10の位置から20目盛あきに行なった。黒丸が測定点を表わす。図から濃度は目盛30から210までほとんど線形、目盛230から以後は傾きが多少小さくなって、やはり線形に増大していくことが認められる。DW1のその他の波長、またDW2の各波長についての濃度変化の傾向はこれと同様であるが、波長により多少傾きが異なっている。そこでTable 2.2にウエッジ別、波長別の目盛30から210までの濃度変化の傾きを示す。実際の実験では波長によりその範囲は異なるがウエッジは目盛にして30から240までの範囲内で用いた。

ウエッジの目盛と濃度値のキャリブレーションには各実測点の濃度値はそのまま、その他の点では線形補間した値を用いることにした。

次に白色光に対するウエッジの濃度変化を同様に測定した。この場合は測光計の光検出部に比視感度(V_λ)フィルターを付け、視感透過率(luminance transmittance)の変化として濃度変化を表わすことにある。測定は目盛10から10目盛あきに行なった。結果として、濃度変化は単色光と同様な傾向でありTable 2.2に目盛30から210までの濃度変化の傾きを表わす。

[光路I, IIの分光エネルギー分布]

光路I, IIの分光エネルギー分布を波長400から700 nmまで5nmあきにウエッジの目盛を30一定にして行なった。放射計は前項と同じものを用

Table 2.2 ウエッジ1, 2 (DW 1, 2)の各波長光及び白色光に対する濃度変化の傾き。

Wavelength (nm)	Slope (Density/deg.)	
	DW1	DW2
400	0.0157	0.0152
450	0.0155	0.0149
500	0.0152	0.0145
550	0.0149	0.0142
600	0.0146	0.0139
650	0.0143	0.0136
700	0.0139	0.0134
Mean	0.0149	0.0142
White	0.0148	0.0143

いた。分光エネルギー分布は各波長に対する放射計の出力をその波長に対する放射計の感度で割って求める。

Fig. 2.9 の上図に光路Ⅰ, 下図に光路Ⅱのエネルギー分布を示す。両者は1濃度上下にずらして表わしてある。470 nm 付近のピークはキセノンランプの輝線によるものであると考えられる。

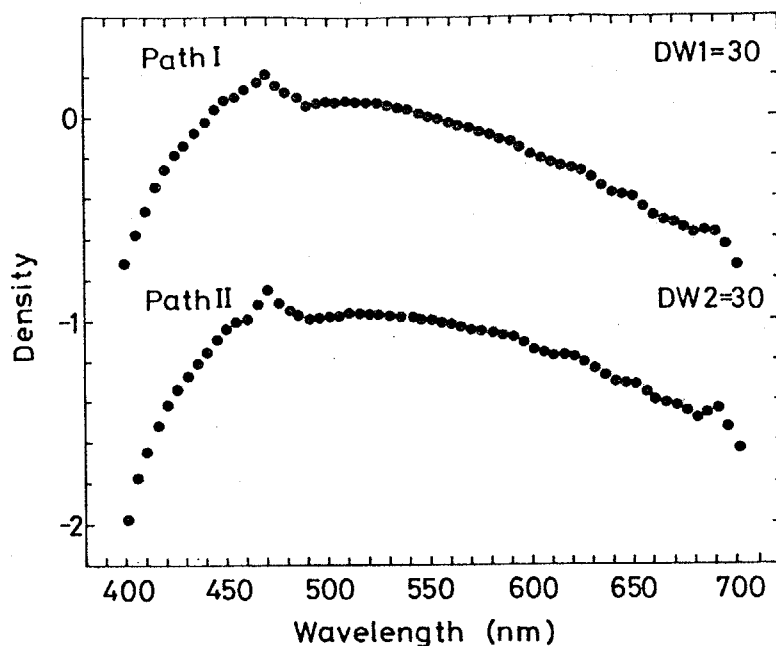


Fig. 2.9 光路Ⅰ, Ⅱ (pathⅠ, Ⅱ) の分光エネルギー分布。各ウエッジの目盛30で測定した。それぞれの結果は1unit上下にずらしてある。

[モノクロメータの波長目盛の較正]

水銀ランプの輝線を用いてモノクロメータMM1, MM2の目盛の較正を行った。小型の水銀ランプの発光部をモノクロメータの入射スリット上に陸像してその出力を放射計(前項と同じもの)で測定する。水銀の輝線中から波長が可視域にあり、隣接して2本以上並んでいないもの、すなわち435.8nm, 546.1nmを選んだ。モノクロメータを輝線の周辺で0.1nmステップに動かして、最大の出射強度を与える目盛を求めた。結果をTable 2.3に示す。MM1では、約0.3nmだけ目盛の方が実際の波長よりも小さい値を示し、MM2では一致している。したがって、MM1の場合はその目盛に0.3nm加えた値が真の波長値と考えられるが、0.3nmという値はモノクロメータの波長の再現

Table 2.3 モノクロメータ 1.2 (MM1, 2) の目盛の較正結果。水銀のスペクトル輝線のうち 435.8 nm と 546.1 nm のもの 2 本を用いた。

Spectral line	Scale	Difference (nm)
MM1:		
435.8	435.6	-0.4
546.1	545.7	-0.2
MM2:		
435.8	435.8	0.0
546.1	546.1	0.0

性の約 0.1 nm と同程度の値であるため、実験結果にはこの値を補正しないで目盛の値とそのまま使うことにした。

〔網膜照度の測光〕

実験で用いた明るさレベルを表わすために基準光の網膜照度を測定した。実験の章で後述するように基準光は光路 I の 570 nm , DVI の目盛 200 のものを用いた。照度計 (前項と同じ放射計に比視感度 (V_λ) フィルターを取り付けて用いる) をマックスウェルレンズ L11 (Fig. 2.3 参照) の集光点の後に置いて測光する。

Fig. 2.10 に示すように照度計の位置を D ,

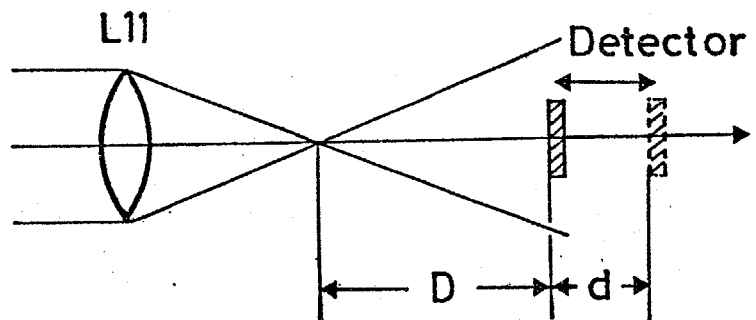


Fig. 2.10 網膜照度の測定方法, 照度計の距離を変化させてその照度の変化から網膜照度を計算する。

その位置での照度を K ルクス (lux) とおると、網膜照度 B td は

$$B = 10^6 \cdot D^2 \cdot K$$

で表わされる。したがって、照度計が $D+d$ の位置では、

$$B = 10^6 \cdot (D+d)^2 \cdot K'$$

となり、2式より D を消去して、 B を求めると、

$$B = 10^6 \cdot d^2 \cdot K K' \left\{ \frac{(K'+K) + 2\sqrt{K K'}}{(K-K')^2} \right\}$$

となる。そこで、照度 K, K' と d を測定すれば、 B を求めることができる。

4回ずつ2日に分けて測定し、平均すると $76.3 \pm 10.8 \text{ td}$ となった。

2.3 電気制御系

2.3.1 構成

電気制御系は電子計算機を中心にして構成され、Fig. 2.3 の破線で示すように光学系のモノクロメータ2台 (MM1, MM2), ウェッジ2台 (DW1, DW2) および シャッター3台 (SH1, SH2, SH3) を制御している。これにより刺激の波長, 強度, 呈示時間が自動的に設定される。また、ブザーBZにより被験者に合図を送り、スイッチSWを介して被験者からの応答を取ることも行なう。さらに、被験者の応答は電子計算機により実験終了後、簡単な統計処理もされる。

制御系全体の構成図は、Fig. 2.11に示す。電子計算機はLSI-11 (DEC社) のモジュールを中心にして構成されたマイクロコンピュータ RAMDA-16 (理経コンピュータ社) を使用した。3台の汎用型16ビット・パラレル入出力インターフェイスを介してCPUはモノクロメータ, ウェッジ, シャッター等のコントロール部, および読み取り部に接続されている。インターフェイスI, II はそれぞれモノクロメータ, ウェッジの制御用, インターフェイスIII はシャッター, ブザー, スwitchの制御用である。MM1とMM2, 手Eは

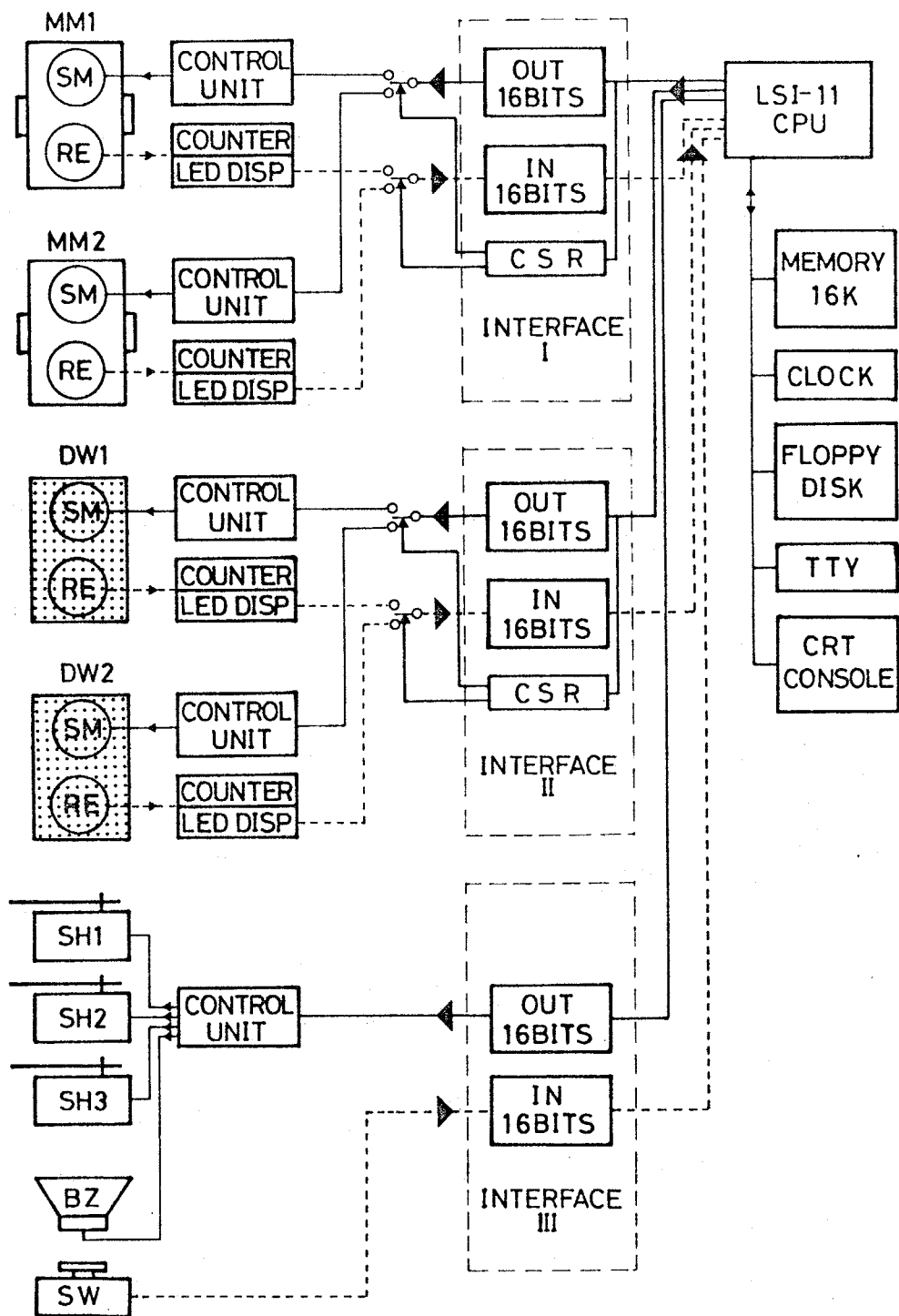


Fig.2.11 電気制御系の構成。電子計算機 (LSI-11) は3位のインターフェイスを介して、モノクロメータ、ワッジ、シャッターを制御している。モノクロメータ、ワッジはステップモータ (SM) により駆動され、位置はロータリーエンコーダ (RE) により読み取られる

DW1とDW2の切り換えはインターフェイスのコントロール・ステータスレジスタ(CSR)の入出力コントロール信号(CSRΦ, 1)によりゲート回路を開閉して行なった。

モノクロメータ内のグレーティング部はステップモータSMにより回転駆動され、その位置、すなわちモノクロメータの波長の値はロータリー・エンコーダREからの信号をカウンターで加減して求める。カウンターの内容はLEDディスプレイに表示され、外部にいてもモノクロメータの波長が読めることができる。波長は0.1nmステップで表示される。ウエッジも同様にステップモータSMにより駆動され、ロータリーエンコーダREでその回転角を0°から360°まで1°ステップで読み取るようになっている。ウエッジ1°は濃度にして約0.013~0.016となっており、十分に細かい分割であるといえる。モノクロメータは100nmの走査に約15秒、ウエッジは1unitの濃度の走査に約17~18秒で済む。また、モノクロメータ、ウエッジはそれぞれ独立に駆動できるため刺激の波長、強度を能率よく、おぼやく変化させることができる。

シャッターは3台、それぞれ独立に任意の時点で任意の時間幅だけ開閉でき、刺激呈示の時間的制御が容易となっている。ブザーもシャッターと同様の方法で正よく制御できる。スイッチは計4個あり、そのうちのいくつかを実験に使用した。

図中のモノクロメータのカウンターと、LEDディスプレイ部、シャッターのコントロール部、及び汎用インターフェイス部と各装置のコントロール部、読み取り部をつなぐバッファ、ゲート部分は自作した。これら自作部分の回路は次項2.3.2に記載した。電子計算機には、その他半導体メモリー16K、クロック、フロッピー・ディスク装置、テレタイア及びCRTコンソールが設置され、全体の制御システムを構成している。

プログラミング言語は装置の制御にはMACROアッセンブラー、刺激呈示条件の計算、結果の処理および実験全体の制御にはFORTRANを使用した。

主な制御プログラムのフローチャートを次項 2.3.2 に示した。

2.3.2 回路 及び 制御プログラム

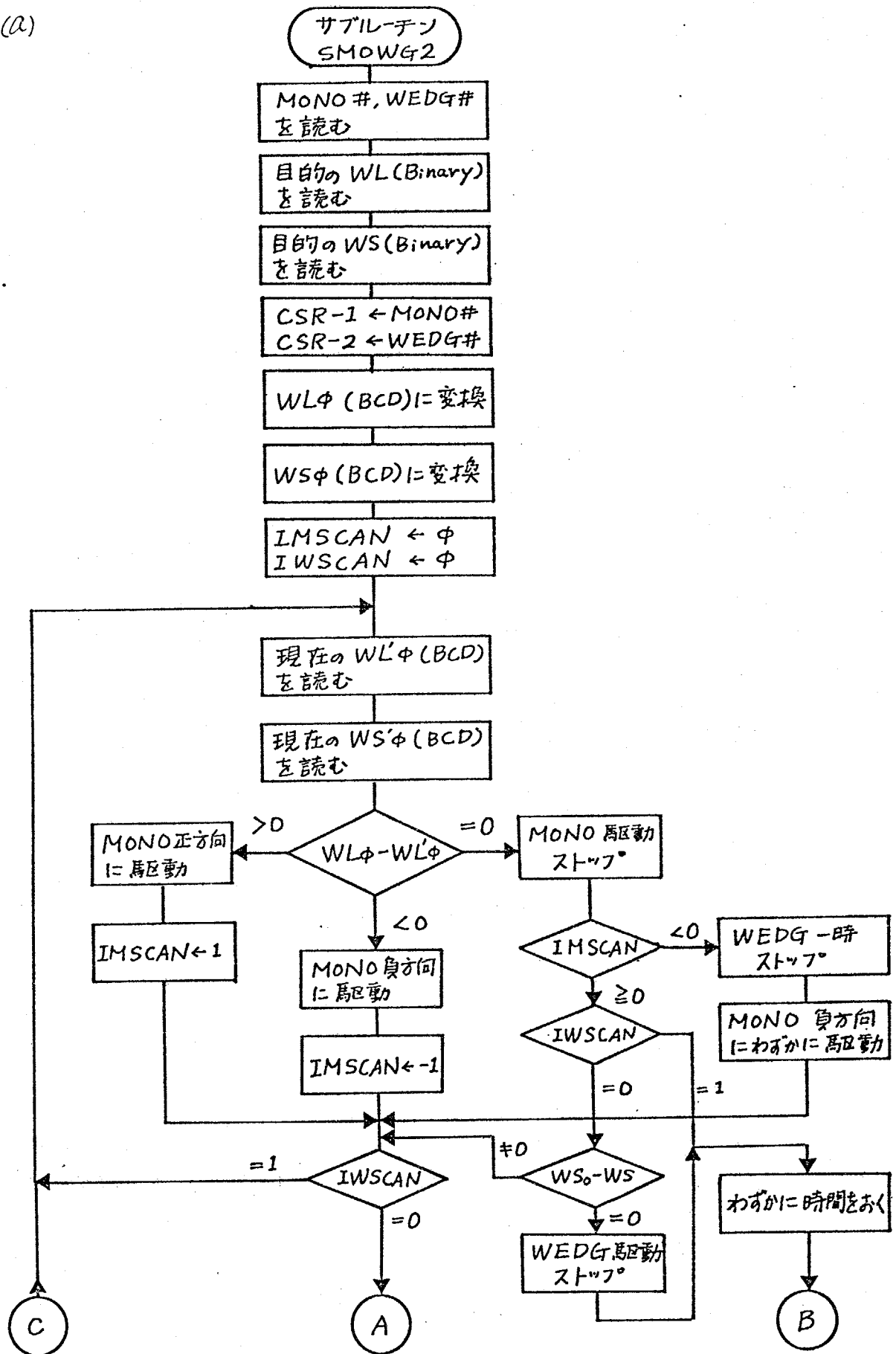
全電気制御系のうち自作した主な部分は

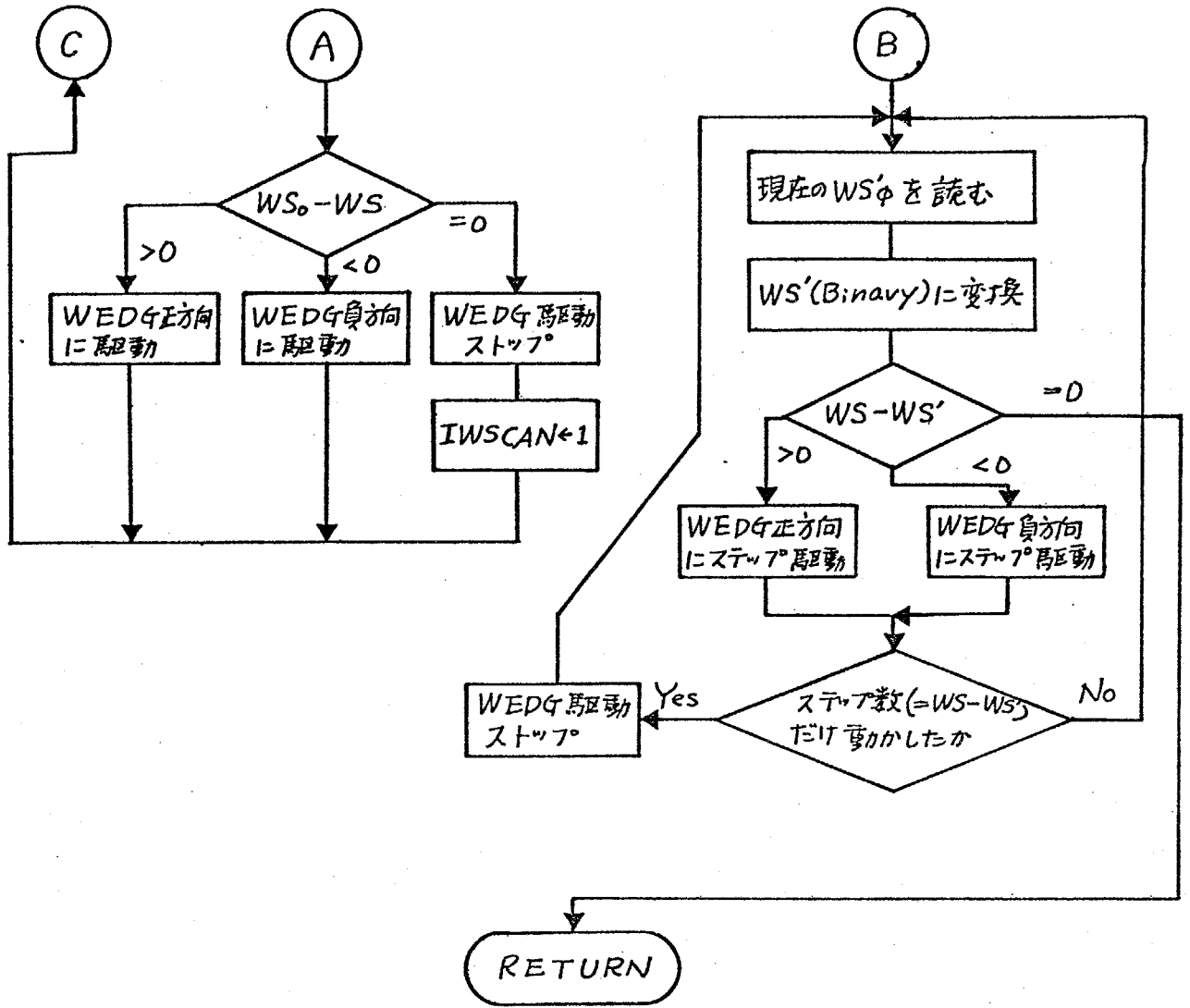
- (a)モノクロメータのカウンター, LEDディスプレイ部
- (b)モノクロメータ 及び ウェッジに対するインターフェイス;コントロール部間の接続部
- (c)モノクロメータ 及び ウェッジに対するインターフェイス;読み取り部(LED DISP)間の接続部
- (d)シャッター 及び ブザーのコントロール部
- (e)スイッチ部

である。実際の回路図は付録Iにのせることにある。

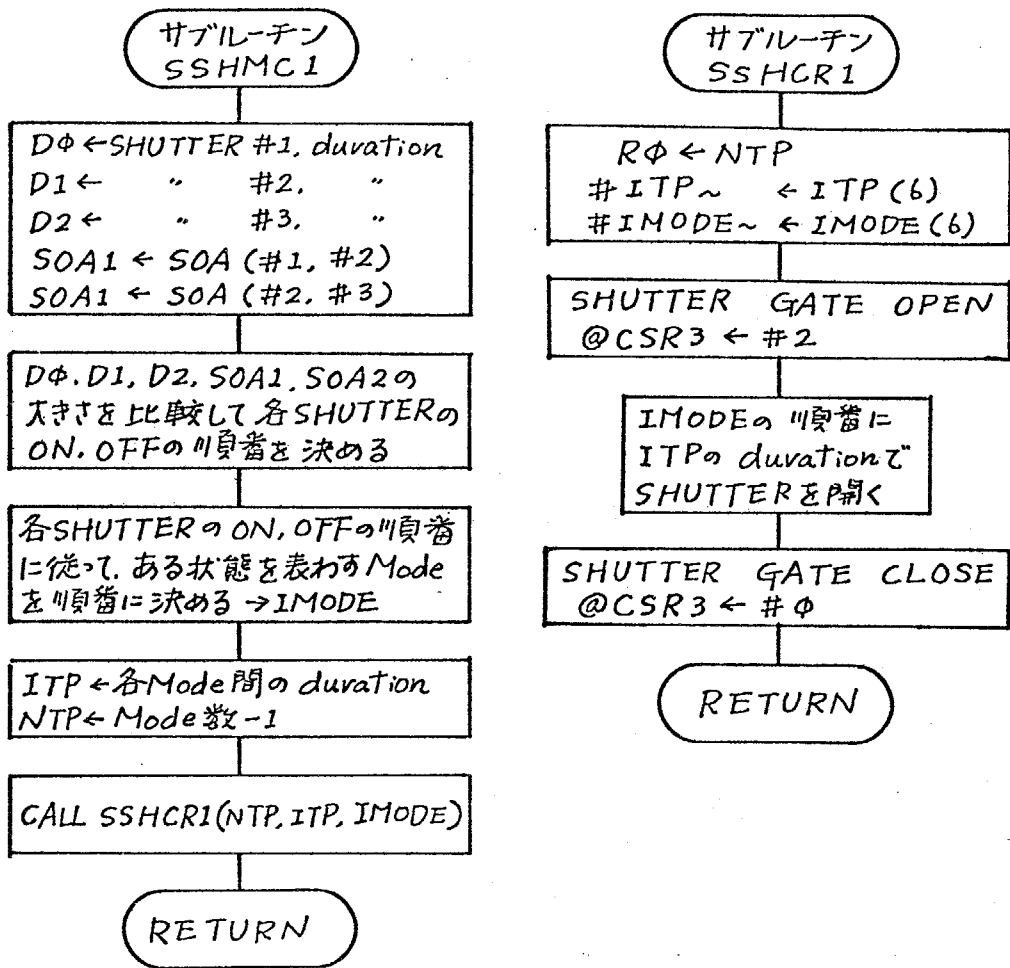
装置の主な部分の制御プログラムのフローチャートを以下に示す。Fig.2.12の実際のプログラムは付録IIにのせることにある。

(a)





(b)



Mode Format

Mode b:T			SHUTTER		
2	1	φ	3	2	1
0	0	0	OFF	OFF	OFF
0	0	1	OFF	OFF	ON
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	1	1	ON	ON	ON

Fig. 2.12 (a) モノクロメータとウェッジの制御プログラムのフローチャート。1個のモノクロメータと1個のウェッジは同時に制御できる。

(b) シャッターの制御プログラムのフローチャート。

第3章 継時波長弁別能の時間特性と波長特性

3.1 実験概要

本実験ではテスト波長 λ_t と比較波長 λ_c の呈示開始時間に、遅れSOA, Tを入れることにより、波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ がどう変化するかを測定する。テスト波長 λ_t としては、可視波長域全体にわたって選ぶものとする。そこで本実験では、 $\Delta\lambda$ を測定する際にSOAと λ_t という2個の変数があることになる。その様子と理解するためFig. 3.1に $\Delta\lambda, \lambda_t, SOA$ の3次元表示をした。横軸に λ_t , 奥行き方向の軸にT, 縦軸に $\Delta\lambda$ を表わす。図中の実線はSOA=0msecの場合の波長弁別閾値であり、これについては1.1節で述べたように様々な実験条件で詳しく調べられている。本実験では、この実線の閾値がSOA軸に沿

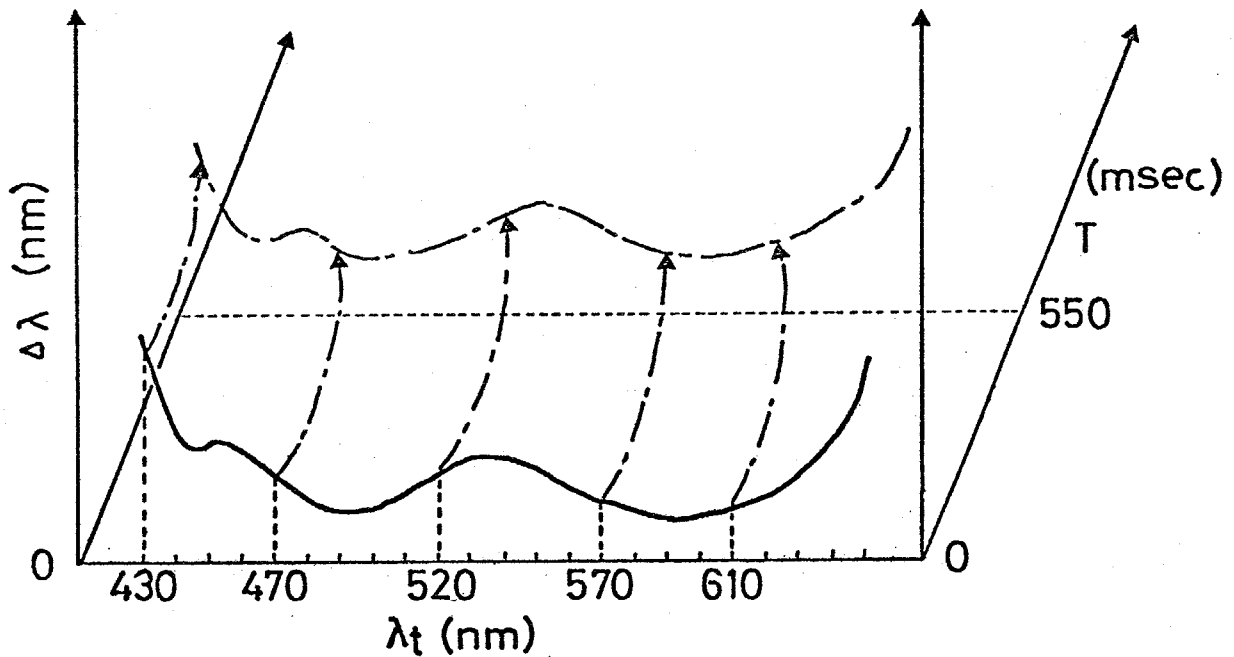


Fig. 3.1 横軸がテスト波長 λ_t , 奥行き軸が呈示開始時間遅れSOA, T, 縦軸が波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ を表わす。本実験では一点鎖線で示した部分に対する $\Delta\lambda$ を測定する。

つてどのように変化していくかを測定することになる。但し、主としてSOAの影響を調べた実験Ⅰ、入光の影響を調べた実験Ⅱに分けて $\Delta\lambda$ の測定を行なう。これはFig. 3.1の入光とSOAからなる平面上のすべての点についての測定は不可能であるため、全体的な形をほぼ把握できるのに必要な点を選んだ結果である。

まず、実験Ⅰでは図中一点鎖線の矢印で示すように入光を430nmから610nmまでの5波長を選び、SOA軸方向の $\Delta\lambda$ の変化、すなわち $\Delta\lambda$ - T 関数の測定をやる。SOAは0から5秒までとった。実験Ⅱでは $\Delta\lambda$ の入光方向の変化、すなわち $\Delta\lambda$ - λ 関数をより詳しく測定するためにはSOA=0.550 msecの2点を選び入光は430から650nmまで、10nmおきにとった。

主実験に先立ち、左右両視野に呈示される各波長の明るさのマッチングをやる。本研究では2波長のクロマティックネスの違いによる弁別を調べることが目的であるから、明るさは常に等しくして呈示する必要がある。明るさマッチングは410から680nmまで10nmおきに行なった。ここで得られるデータ、すなわち各波長に對して等明るさを与える光路Ⅰ、ⅡのフェッジDW1, DW2の値は、以後等明るさの刺激が必要な場合に参照されることになる。

なお、本研究では実験実施期間が1年以上あり、その途中で装置を移動する必要があった。実験結果のほとんどは移動後の装置で行ったものであるが、その一部*は移動前の装置によるものである。明るさマッチングは移動後、再度行なった。

3.2 被験者

色覚正常者KU, HU, SOを用いた。KUは20才台後半の男子で本論文の著者である。近視のため矯正用眼鏡を使用。矯正視力は右眼で1.2である。このような心理物理学の実験に豊富な経験を持っている。HUは20才台後半

* 実験Ⅰ KU, 570, 520nm, シーズ(I)。HU, 570nm, シーズ(I)

の女子で、職業は大学の助手である。裸眼視力は左眼で 1.2 である。被験者として十分な経験があり、本実験の目的、内容もよく理解している。SO は 20 才前半の男子で大学院の学生である。近視矯正用眼鏡を使用し、矯正視力は右眼で 1.0 である。被験者として、ある程度の経験があり、本実験の目的、内容もほとんど理解している。

KU, HU は実験 I, II 及び補足実験すべてに参加し、SO は実験 II のみに参加した。

3.3 明るさマッチング

3.3.1 方法

[手続]

直接比較法による明るさマッチング (direct brightness matching) を調整法により実施した。刺激の視野は主実験と等しく 2° の二分視野を用い、間隔 θ は $11'$ とした。SOA は 0 msec にし、2 刺激は同時に呈示した。刺激の呈示持続時間 D は本実験で用いた値と等しくした。すなわち、 $D = 110 \text{ msec}$ の条件で、KU, HU, SO について、 $D = 55, 220 \text{ msec}$ の条件で KU について明るさマッチングを行なった。

明るさマッチングの手続は二通りに分かれ、手続 1 として二分視野の左半分の視野の明るさを各波長について等しくし、手続 2 としては右半分の視野の明るさを各波長について等しくする作業がある。

—手続 1—

Fig. 3.2 に示すように、参照刺激 (reference stimulus) として右の視野に波長 570 nm , 網膜照度* 76 td^{**} の刺激光を呈示する。左の視野には、マッチング刺激 (matching stimulus) のある 1 波長が呈示される。したがってこの場合は異色明るさマッチングになる。被験者は手元のスイッチにより

* 網膜照度の測定は 2.2.2 項の測光とキャリブレーションを参照。

** 光学系の移動前の装置ではこの基準光の網膜照度が多少高い可能性がある。

光路Ⅱ(左の視野)のウェッジDW2の濃度を増減させて、マッチング刺激の明るさを参照刺激の明るさに合わせる。これが1試行になる。左の視野の間隔θは11'にした(Fig. 2.4参照)。固視点は連続呈示で被験者は常時、固視点を見ている。刺激は左右同時に約2 sec 周期で呈示され、マッチング刺激の波長は10nmおきに選ばれ410~500nmの10波長, 510~600nmの10波長, および610~680nmの8波長の3ブロックに分けられる。1セッションでは1ブロック内の波長がマッチング波長としてランダムな順序で呈示され、各マッチング刺激に対して4回の試行を行なった。KU, SOでは5セッション、各マッチング波長に対して計20回の試行、HUでは4セッション計16回の試行の結果を平均して等明るさと与えるウェッジDW2の値(WWS2)を求めた。

—手順2—

次に右の視野に呈示される各波長の明るさを等しくする作業に移るが、このとき左の視野を参照刺激として手順1で求めた等明るさの対応する波長を与ればより判断の容易な等色明るさマッチングによって、本作業を完了することが出来る。したがってこの時の視野は、Fig. 3.3に示すように

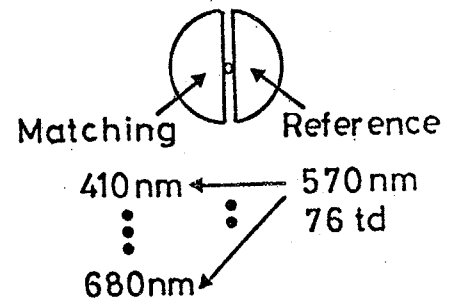


Fig. 3.2 明るさマッチングの手続1。左のMatching視野(410~680nm)の明るさを右の参照視野(570nm, 76td)の明るさに合わせる。

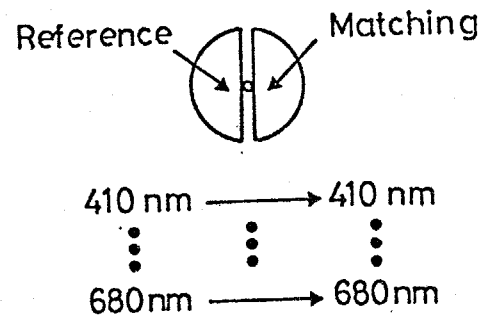


Fig. 3.3 明るさマッチングの手続2。右のMatching視野(410~680nm)の明るさを左の参照視野(410~680nm)の明るさに合わせる。波長は左右の視野で等しくする。

なり、左の視野の参照刺激は Fig. 3.2 のマッチング刺激が与えられることになる。被験者はウエッジ DW1 の濃度を増減して、マッチング刺激と参照刺激の明るさを合わせる。その他の手順、各被験者の試行数は手順 1 と同様である。このようにしてここではウエッジ DW1 の値 (WS1) が各波長に対して平まることになる。

被験者 KU は $D=55, 220$ msec の条件でも明るさマッチングを行った。ブロッカ・ガルツァー (Broca-Sulzer) 効果として周知のように (池田, 1975) 刺激の呈示時間によって明るさ感覚は異なってくる。そこで、この場合でも、明るさレベルを $D=110$ msec の場合に揃え、条件間の明るさレベルによる違いを取り除くために、手順 1 における参照刺激である 570nm の波長に対するウエッジ DW1 の値は次のようにして決定した。まず右の視野に基準刺激として 570nm , $D=110\text{msec}$, 76td の刺激を、左の視野に 570nm , $D=55$ (あるいは 220) msec の刺激を呈示する。被験者は左の視野のウエッジ DW2 の濃度を変化させ、右の視野と明るさマッチングをする。次に左の視野の DW2 は上で求めた値にセットする。左の視野共には 570nm , $D=55$ (あるいは 220) msec の刺激を呈示する。被験者は今度は右の視野のウエッジ DW1 の濃度を変化させ、左の視野と明るさマッチングをする。これで、明るさレベルを等しくする DW1 の値が平まることになる。

手順 1, 2 の実際のプログラムは付録 III に載せる。

3.3.2 結果とその利用

Fig. 3.4 に被験者 3 人の比視感度曲線を示す。比視感度曲線は 2.2.2 項で測定したウエッジの濃度変化及び光路 I, II の分光エネルギー分布をもとにして、計算して求める。 $D=110\text{msec}$ であるが、KU については $D=55, 220\text{msec}$ の結果も同時に示してある。縦軸は相対感度、横軸が波長を表わ

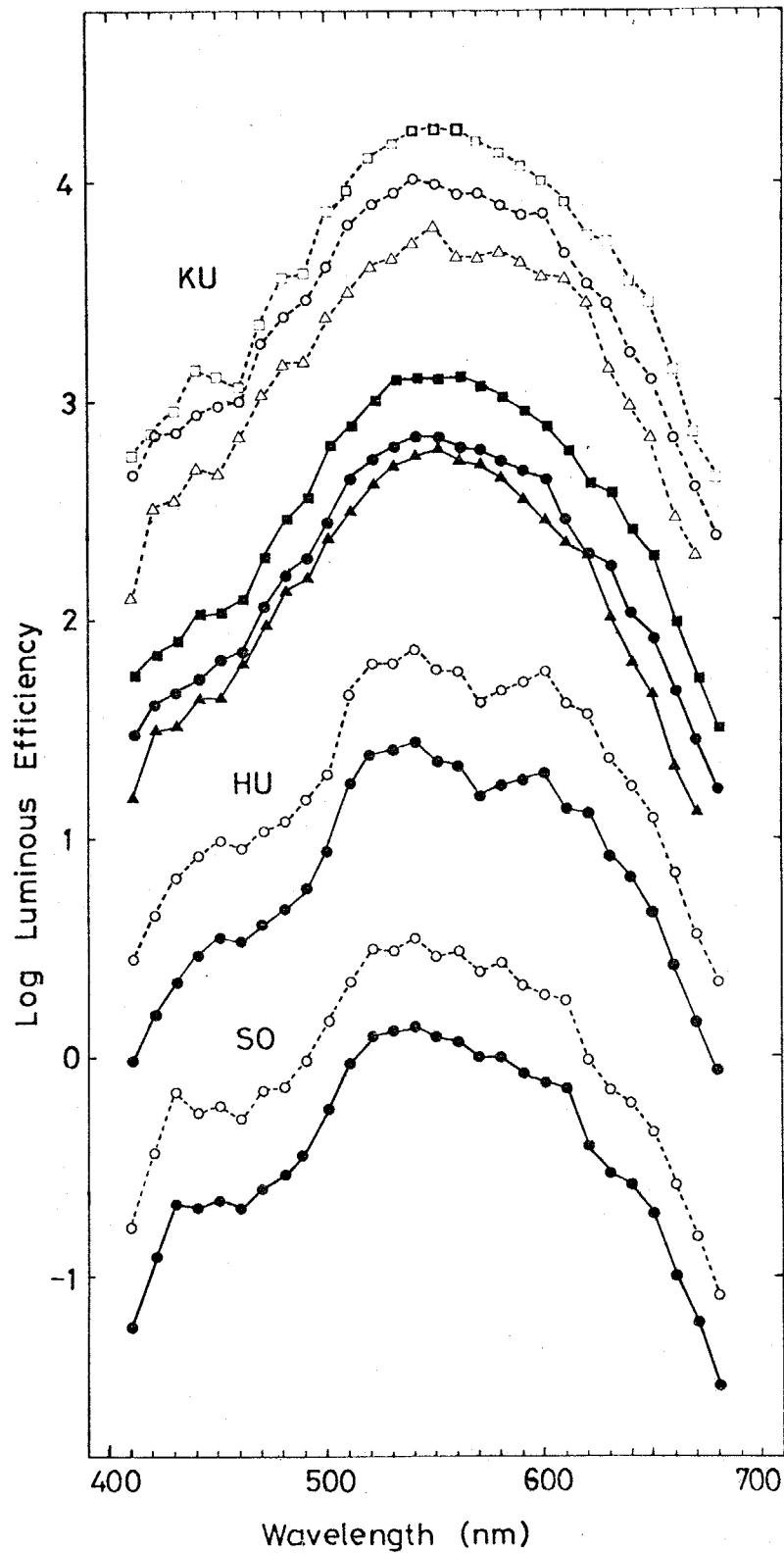


Fig. 3.4 3人の被験者の比視感度曲線。横軸が波長，縦軸が相対感度と表わす。各被験者共に黒シンボルが左の視野，白シンボルが右の視野に相当する。呈示持続時間Dは ▲, △: 55 msec, ●, ○: 110 msec, ■, □: 220 msec となっている。

す。図中、黒シンボルが左の視野、白シンボルが右の視野とマッチングした時の結果で、両者は上下にシフトして描いてある。3人の被験者共に、曲線の形は過去のデータ (CIE Technical Report, 1977) のぼらつきの範囲内でよく一致しており、3人の比視感度は正常といえる。

この比視感度の計算に使われたもとのウエッジの値が等明るさの刺激を作るために用いられるわけであるが、測定は10nmおきに行なったため、呈示したい波長が測定波長にある場合が起こる。そのときはもとのウエッジの値で線形補間して呈示したい波長に対応するウエッジの値を決定した。比視感度を補間し、それとウエッジの値に逆変換する方法もあるが、2.2.2 で示したようにウエッジの値は濃度に関してほとんど線形、光学系の分光特性は滑らかであるため、両者の方法にはほとんど差がないと考えられる。そこでここではより計算手続の容易なウエッジの値で補間する方法を採用した。また、10nmおきの測定は数nmの差を問題にする波長弁別に用いるには粗すぎるようにも感じられるが、隣り合った測定点での比視感度には大きな差はなく、さらに滑らかにつながるので、10nmおきの測定点と補間すれば等明るさを与えるウエッジの値を決めるには充分であろう。これは実験時にどの刺激対でも明るさの違いはほとんど感じられなかったという被験者からの報告からも裏付けされるものである。

3.4 実験I: 継時波長弁別閾値の時間変化, $\Delta I-I$ 関数の測定

3.4.1 方法

[手続]

本研究の継時波長弁別法ではいくつかのダミー刺激がテスト刺激と置き換わって呈示されるため、複数個の波長について時間的に平行して測定点を求めることになる。閾値を求める方法には、1.1 節で述べた恒常法、調整法、さらに極限法 (method of limits), 上下法 (up-and-down method) などが

ある (Guilford, 1959)。調整法, 極限法による *j. n. d.* の測定あるいはマッティングでは被験者の仕事が増加し複雑になりすぎると考えられる。したがって被験者の判断法を二択法 (forced-choice method) にして、より仕事を容易にできる恒常法, 上下法を用いることが適当であろう。小さい差と正確に測定するには恒常法の方が上下法よりも優れているため (Siegel, 1962)、ここでは前者を用いて波長弁別閾値を求めた。ただし測定に長い時間を必要とするため、テスト波長は全可視域から代表的な5波長に限ることとした。

呈示刺激としてはあるテスト波長 λ_t を選び、その周囲の波長から9個の比較波長 λ_c と決める。 λ_c の選び方は Fig. 3.5 に示すように、被験者の予想応答曲線を考慮して決める。Fig. 3.5 の横軸は波長であり、9個の λ_c の位

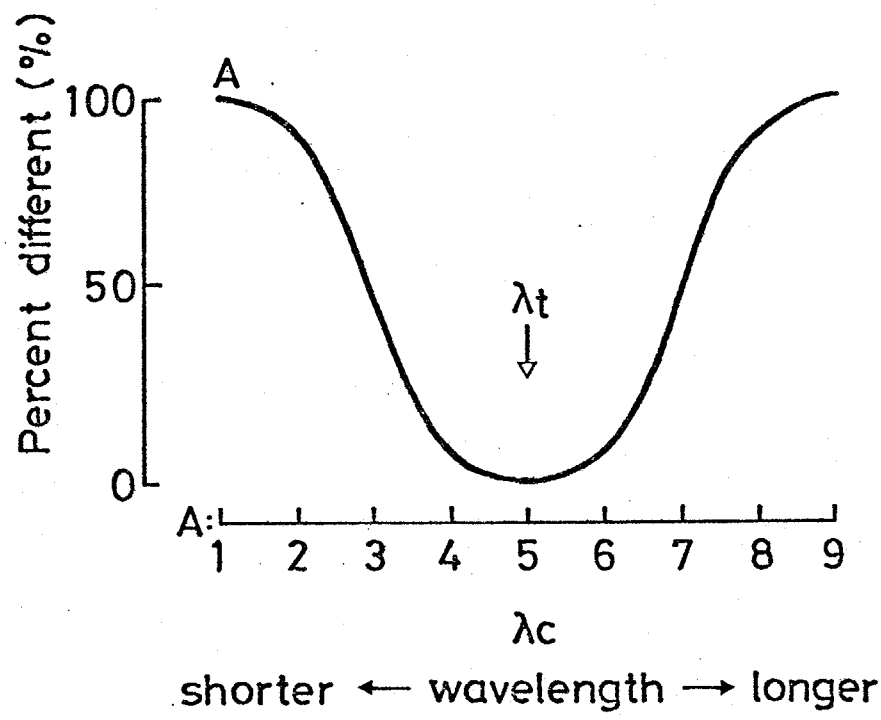


Fig. 3.5 比較波長 λ_c の選び方。横軸は9個の比較波長を番号で表わしてある。縦軸はテスト刺激と比較刺激が違って見えるという応答の割合を示し、図中の実線は示す予想応答曲線に合わせて、 λ_c の範囲を決める。

置と番号で表わしてある。縦軸はテスト刺激と比較刺激が違って見えるという応答の割合を示す。図中の曲線は被験者の予想応答曲線の例で、 λ_c が λ_t より離れるにつれて違って見えるという一般的な傾向を示している。この曲線が λ_t に対して、短波長側のほぼ 100% から長波長側のほぼ 100% と与えられた波長間、あなわち短波長側と長波長側ではっきりと并列できる 2 波長間と等間隔のステップで分けるようにして $\lambda_c 1, 2, 3, \dots, 8, 9$ と選んだ。 λ_t が他の波長となると予想応答曲線の傾きも幅も変化するため閾値を求めるためには、 λ_c のステップ幅を変えて $\lambda_c 1$ から $\lambda_c 9$ までが応答曲線と十分にカバーし、かつ応答曲線の変化ある部分に対応するように λ_c の選び方を調節する必要がある。

実際の実験では、本実験に先立ち前実験を行ない、 λ_c の範囲を縮小拡大するなどして、被験者の応答に合う範囲を決めておく。本実験では、 λ_c の範囲が被験者の応答と著しくおれてしまうときにはその範囲を左右に 1, 2 ステップシフトするようにしたが、それ以外では前実験で決めた範囲が最後まで用いられた。

被験者はまず暗室に入り、1, 2 分間の暗順応をする。その後実験が開始されるが、初めての場合には次のようなインストラクション (instruction) が被験者に与えられる。

「これから左右の視野に同じ色が呈示されたり、違う色が呈示されたりします。被験者は左右の視野の色と比較して“同じ”と見えれば、左のボタン、“違う”と見えれば右のボタンを押して下さい。ここでいう“色”とは刺激光のクロマティックネスのことです (必要ならばクロマティックネスと明るさの違いの説明をある)。判断は刺激呈示の直後に行なうようにして下さい。“同じ”か“違う”かの判断基準は自分で思うとおりにして下さって結構ですが特に 2 刺激の違いを見つけるように努力したりあるいは逆に 2 刺激と同じに見ようと努力することはないようにして下さい。右の視野が先に、左の視野が後に呈示される場合がありますが、この場合の判断基準も左右の視野が同時に呈示された場合と等しくするようにして下さい。常に固視点の位置を見て下さ

い。しかし、強く見つめる必要はありません。(以下、試行数、時間、誤ってボタンを押した場合の処理等、細かい説明をある。)

以上のインストラクションで示したように被験者は呈示されたテスト刺激と比較刺激のクロマティックネスが“同じ”か“違う”かを判断して二者択一法により応答する。被験者の判断は比較刺激が呈示された直後にあるように指示した。もし、スイッチを誤って押してしまった場合にはもう一方のスイッチを押すことで応答をキャンセルすることができる。被験者が応答できる時間幅は最大約2秒であり、それ以後の応答は無視されるようにした。上のインストラクションで視野を強く固視しないように指示したのは、1.1節で述べた McCree (1960(a)) の報告にある固視による波長弁別能の劣化の影響を考慮したためである。

ダミー波長は4個 ($\lambda_{d1}, \lambda_{d2}, \lambda_{d3}, \lambda_{d4}$) 選び、その位置は2.1節で述べたようにほぼ λ_c に対する λ_c の範囲内になるようにして決めた。ダミー波長 $\lambda_{d1} \sim \lambda_{d4}$ に対する比較波長の範囲は λ_c に対するものをそれぞれのダミー波長の位置に合うようにシフトして、各々のダミー波長がその比較波長の範囲の中心になるようにした。したがって実際の実験では Fig. 3.5 のようなただ一つの応答曲線が得られるのではなく、次の[結果]の中の Fig. 3.6 に示すような合計5本の応答曲線が得られることになる。

1セッション内ではテスト刺激の波長 λ_c 、SOAは一定とし、テスト刺激は各比較刺激 ($\lambda_{c1}, \lambda_{c2}, \dots, \lambda_{c9}$) に対して5回ずつ、合計45回呈示され、ダミー刺激はテスト刺激の1.2から2倍の約54回から90回呈示される。したがって、合計すると約100回から140回の刺激呈示が1セッション内で行なわれることになる。

実験者は各試行毎にテスト波長、ダミー波長合わせで計5個の波長の中からランダムに1個の波長を選び右の視野(光路I)のモノクロメータをこれにセットする。比較刺激の波長は、テスト刺激、あるいは各ダミー刺激のそれぞれに対する9個の波長の中からランダムに1個を選び、左の視野(光路II)のモノ

クロメータとこれに合わせてセットする。さらに両視野の刺激を等明るさにするためにあでに明るさマッピングして求めてある値に、光路I, IIのウェッジの目盛を合わせる。したがって実験者は1回の試行毎にモノクロメータ2台、ウェッジ2台の目盛を新しい値にする必要があり、もし、人間がこの作業を行なうとしたら膨大な時間がかかり、実質的に実験遂行が不可能になってしまう。そこで本実験では前述したように電子計算機がこの作業を代行し、1回の刺激セットは10秒前後で行なえるようにした。1セッションの実験は約10分から30分間で終了できた。

本実験で行なった λ_t , D, SOA等の条件をまとめて、Table 3.1に表わす。図中の+印が実験を行なった条件である。D=110 msecの場合、SOAが0, 110, 220, 550, 1090, 5450 msecのものシリーズ(1)とし、さらに短い範囲内の値、0, 55, 110, 160, 220 msecのものをシリーズ(2)とした。この分割はシリーズ(2)で $\Delta\lambda$ の値の変化をSOA=0~220 msecの

Table 3.1 実験Iの条件の組み合わせ。+印で示した条件のところで実験を行なった。

λ_t (nm)	430		470				520				570		610	
	KU, HU		KU, HU		KU		KU, HU		KU		KU, HU		KU, HU	
D (msec)	110		110		55	220	110		55	220	110		110	
Series	(1)	(2)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(1)	(2)
g (%)	11	41	11	41	41	41	11	41	41	41	11	41	11	41
SOA(msec)														
0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
30						+								
55		+			+				+	+	+		+	
70						+								
110	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
160		+			+	+			+	+			+	+
220	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
550	+		+			+	+		+	+			+	+
1090	+		+					+					+	+
2000							+				+			
5450	+		+					+				+		+

範囲内で特に細かく測定するためである。テスト波長としては、430, 470, 520, 570, 610 nmの5波長を選んだ。

左右の視野の間隔 g (Fig. 2.5 参照) はシリーズ (1) では視角 $11'$, シリーズ (2) では $41'$ にした。SOA が 0 から 110 msec の間になると $g=11'$ では時間的に先に呈示される左の視野の明るさが減少してしまうという被験者の報告があった。これは隣り合った刺激間の呈示時間遅れによる視覚マスキング (visual masking) 効果、いわゆるメタコントラスト (meta contrast) の現象だと考えられる (Alpern, 1953; Kahneman, 1968)。そこでこの効果と避けるため g を広げ $41'$ とした。この $41'$ という値は左右の視野の間隔を次第に広げていき、それ以上では明るさの減少が観測されない値として決定した。

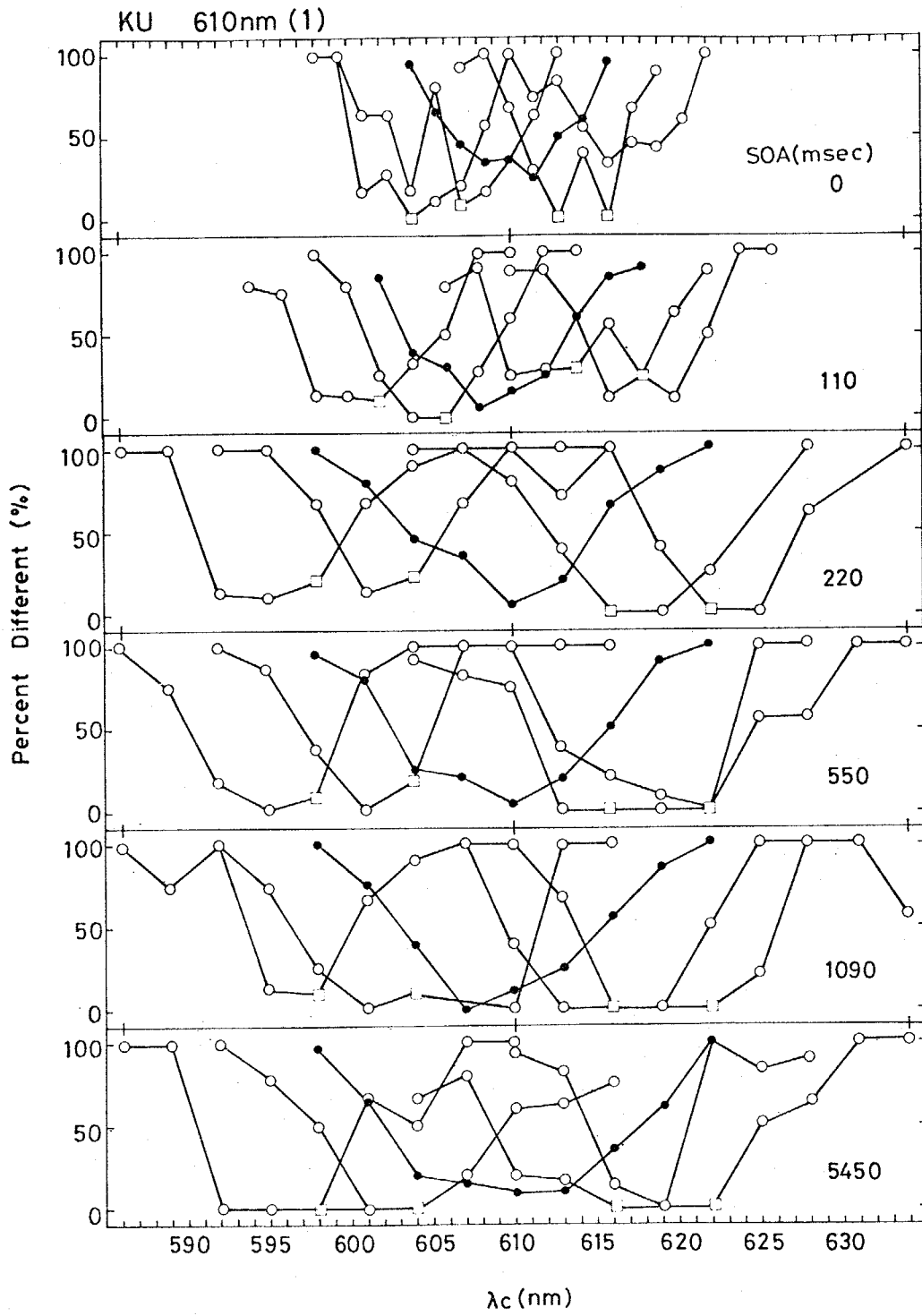
D の効果を調べるために、 $D=55, 220$ msec の条件で実験をさらに行なった。ただし、ここでは HU は実験に参加せず、テスト波長も 470, 520 nm の 2 波長に限った。 $D=55, 220$ msec の場合をそれぞれシリーズ (3) (4) とする。

Table 3.1 の一つの +印に相当する一条件で、KU では 4 セッション、HU では 3 セッションの結果、あなわち各比較刺激に対して、KU では 20 回、HU では 15 回のテスト刺激の反復呈示試行の結果から応答の割合を求めた。表中一つのシリーズの実験はセッション毎に SOA をランダムに採用して行なった。実際の実験プログラムは録 II に載せる。

3.4.2 結果

実験の応答結果の例を Fig. 3.6 に示す。2 人の被験者の 610 nm シリーズ (1) の結果である。横軸は比較波長 λ_c の値、縦軸は被験者がテスト刺激と比較刺激のクロマティックネスが「違う」と応答した割合を示している。図中の黒丸がテスト刺激に対する応答、白丸と白四角がダミー刺激に対する応答を示す。ダミー波長はそれぞれの SOA で 4 個あり、対応する横軸の位置の応答を

(a)



(b)

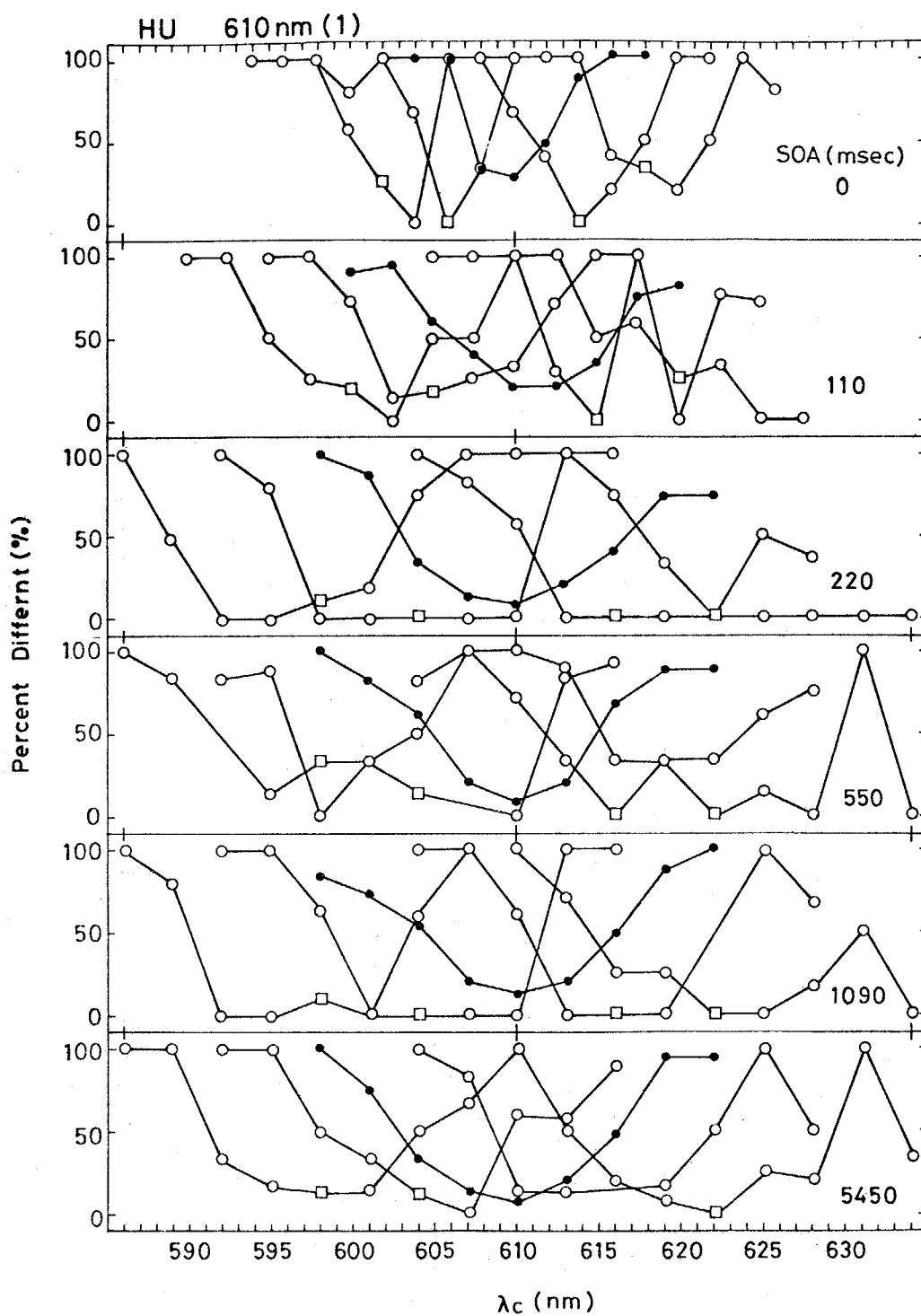


Fig. 3.6 応答結果の例。(a) KU, (b) HU の 610nm, シリーズ(1) の結果。
横軸は比較波長 λ_c , 縦軸は“違う”応答の割合を示す。黒丸がテスト刺激。
白丸がダミー刺激に対する応答で、白四角はダミー波長の位置を表わす。

白四角で示してある。一個のダミー刺激に対する各比較刺激の応答は実線で結んである。ダミー刺激では各比較刺激に対する呈示回数は一固定でなく、1, 2回といったように少ない場合もある。そのため応答曲線は滑らかでないものもあるが、それぞれのものはテスト刺激の応答曲線を横方向にシフトした形となっており、被験者が正しく各試行毎にテスト(あるいはダミー)刺激とその比較刺激と比較し判断していることが認められる。

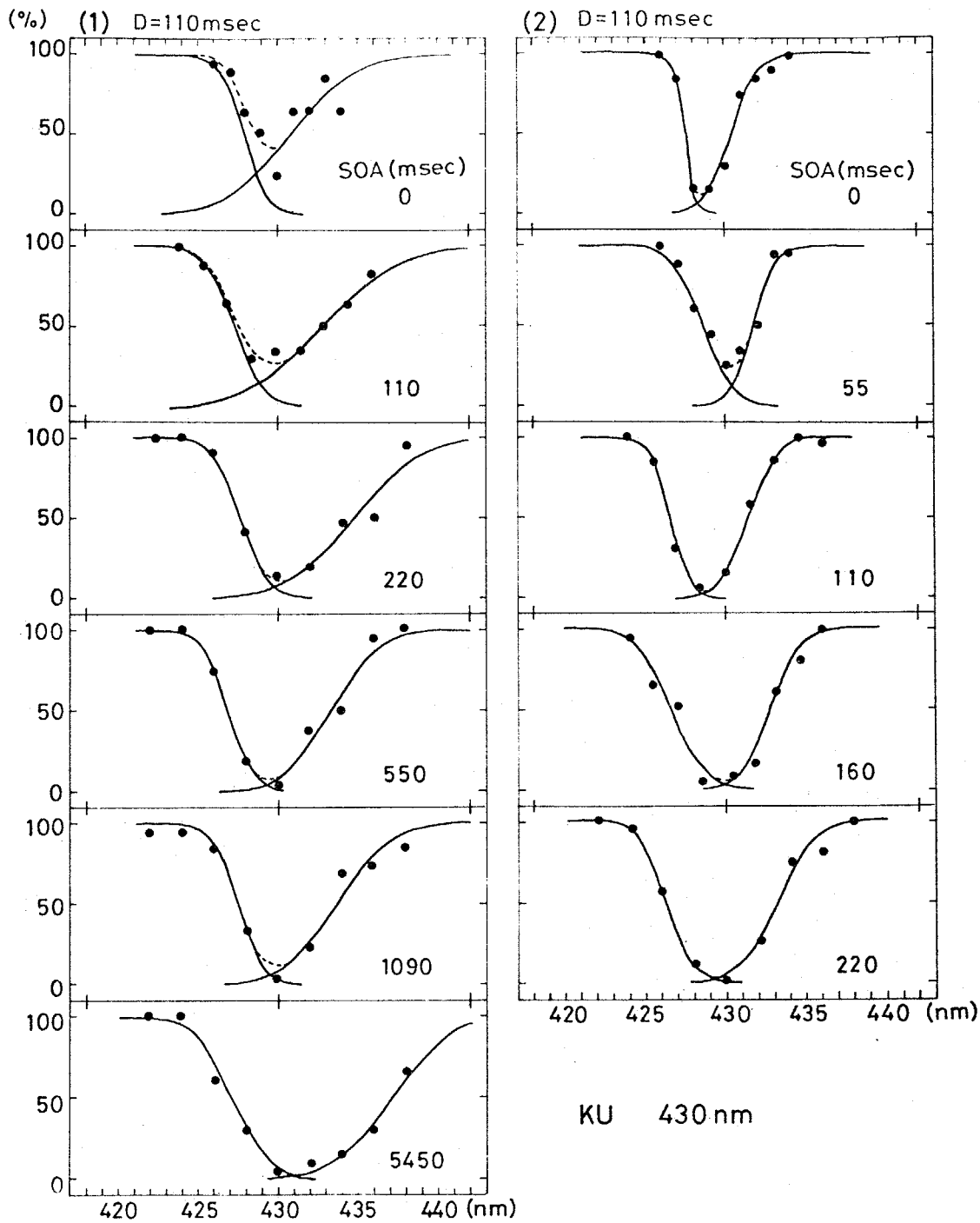
[応答確率曲線]

2被験者の全シリーズの応答結果を Fig. 3.7 (a)~(p)に示す。Fig. 3.6で示したダミー曲線は全て取り除いて入社の応答曲線のみを整理して示したものである。図は被験者別、シリーズ別にまとめられている。横軸は比較波長 λ_c の値、縦軸は被験者がテスト刺激と比較刺激のクロマティックネスが“違う”と応答した割合を示している。図中の黒丸が測定値である。図中の2本の実線と破線は後述するような方法で求めた測定値に合う応答確率曲線である。

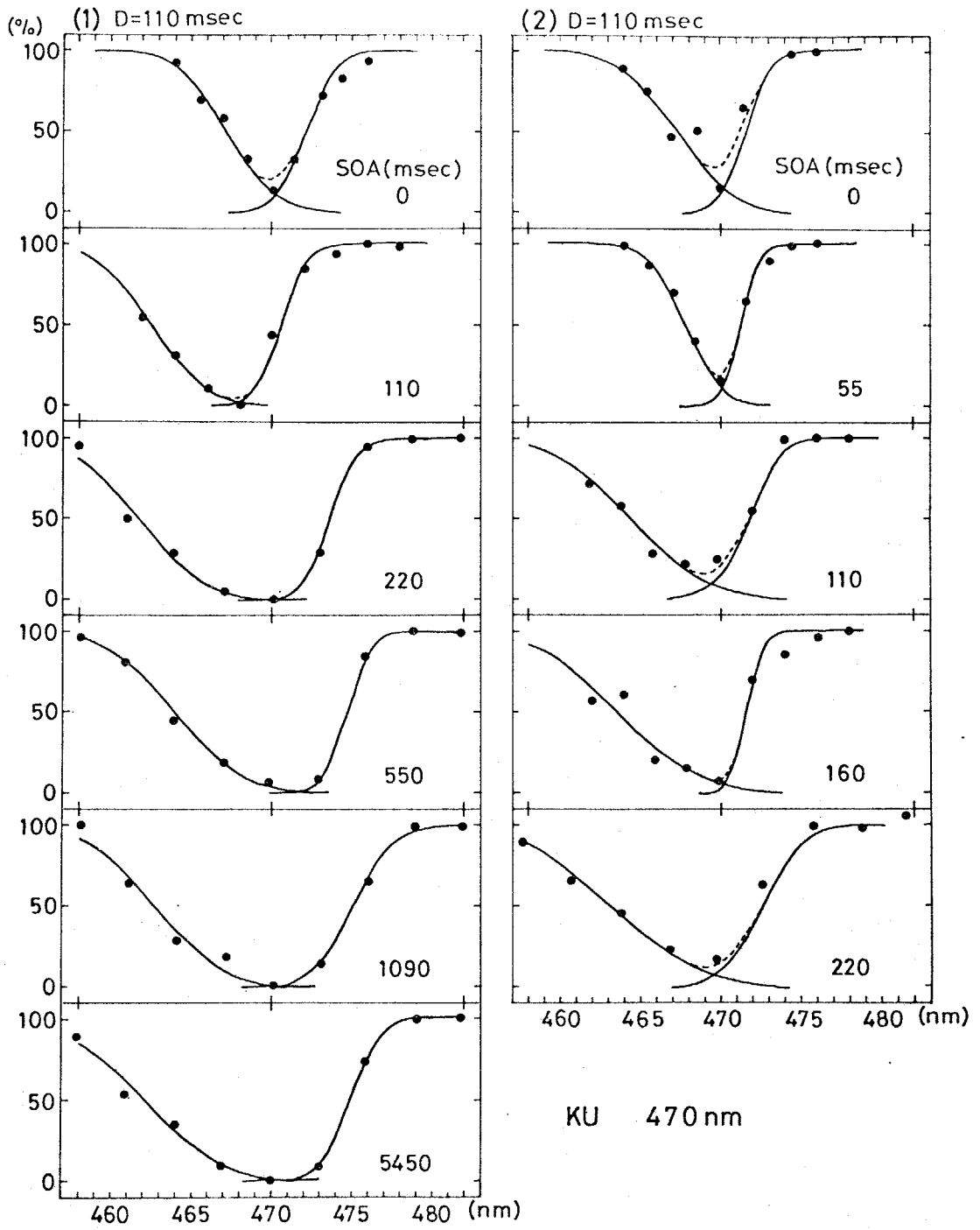
以下 Fig. 3.7 (a)~(p)

Fig. 3.7 2被験者の全シリーズのテスト刺激に対する応答結果。横軸は比較波長、縦軸は“違う”応答の割合を示し、被験者シリーズ別に表わしてある。被験者、テスト波長は図の右下に、呈示持続時間 D 及び呈示開始時間遅れ SOA も図中に示す。黒丸が測定点であり、2本の曲線及び破線は最適応答確率曲線である。詳しくは本文を参照。

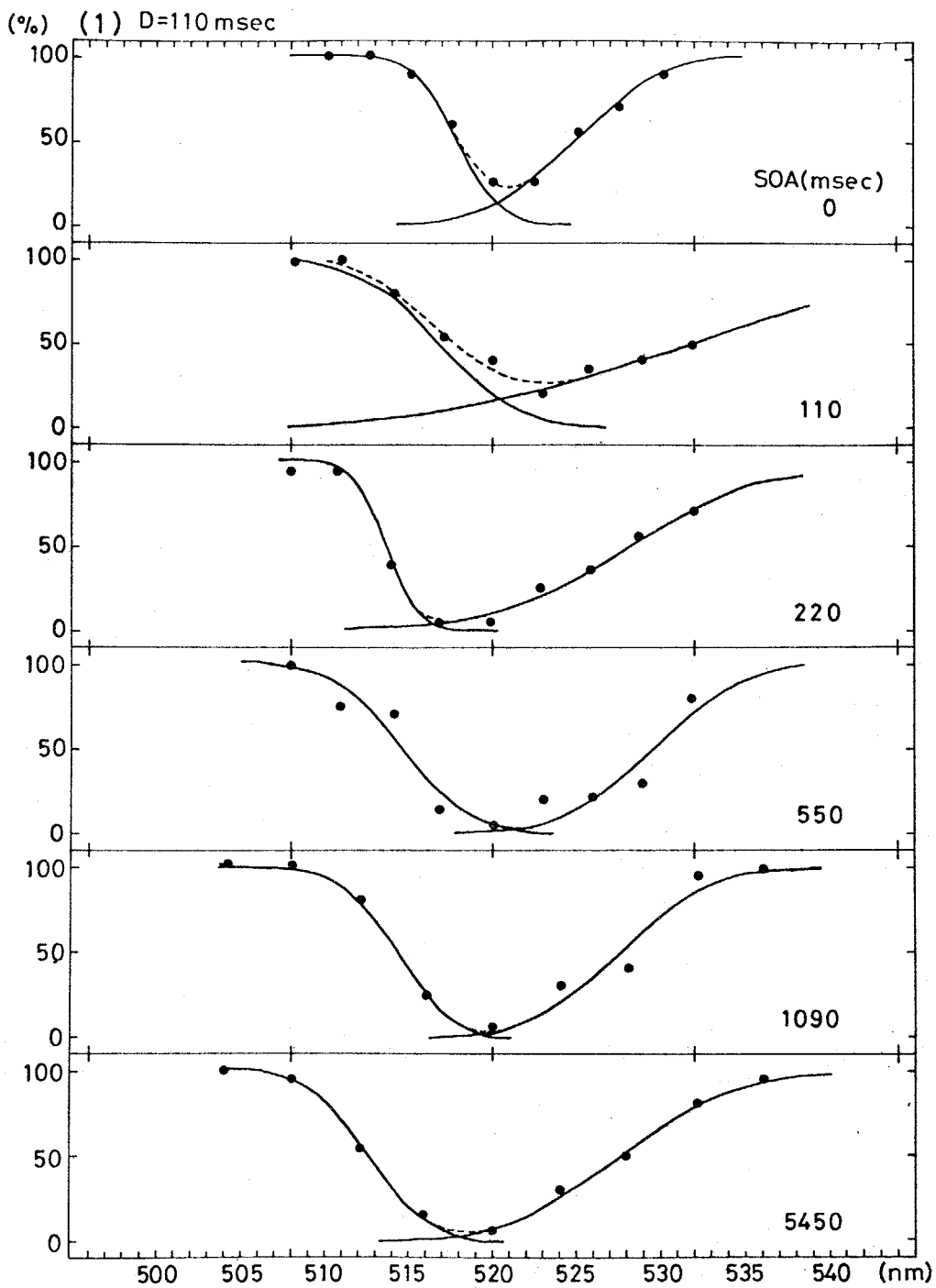
(a)



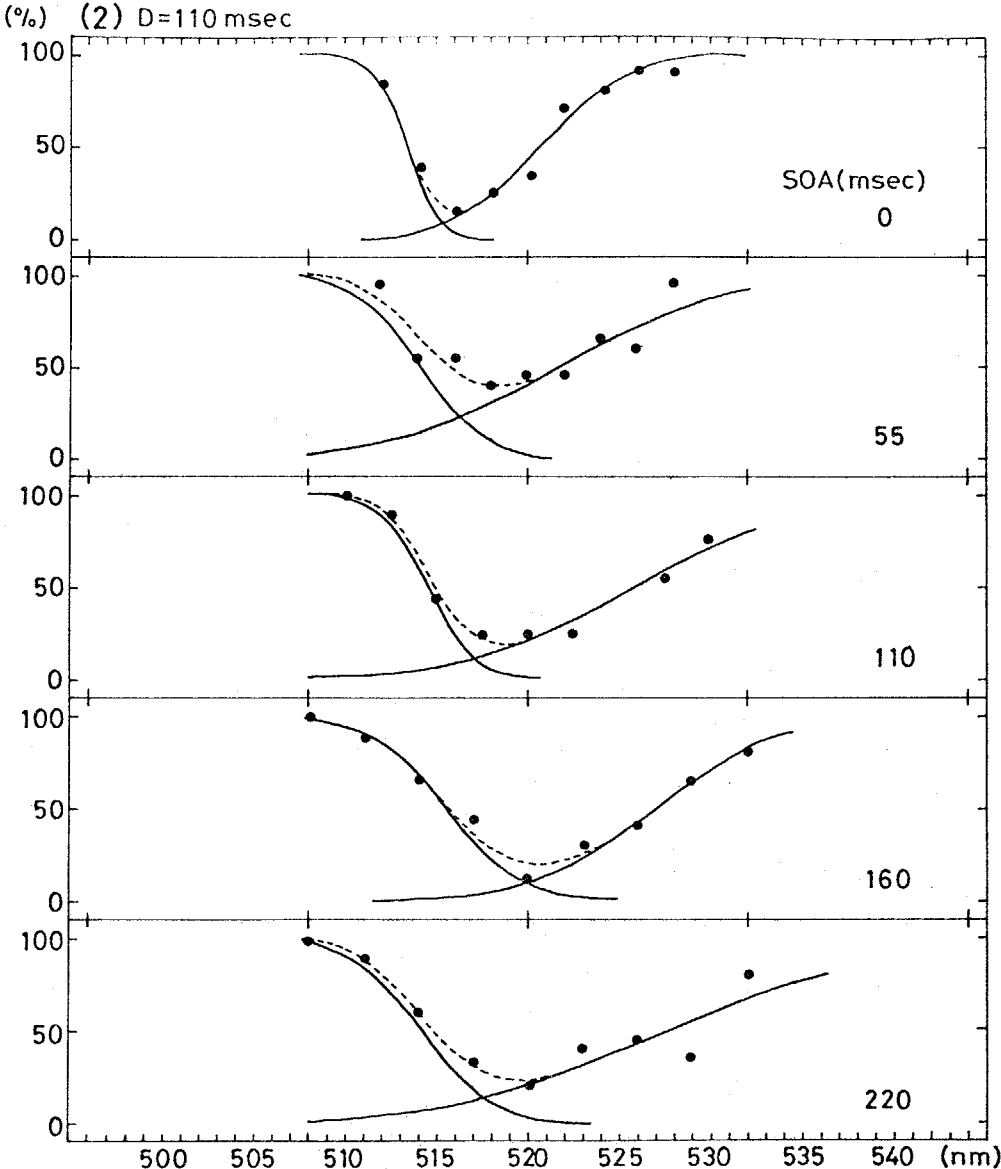
(b)



(C)

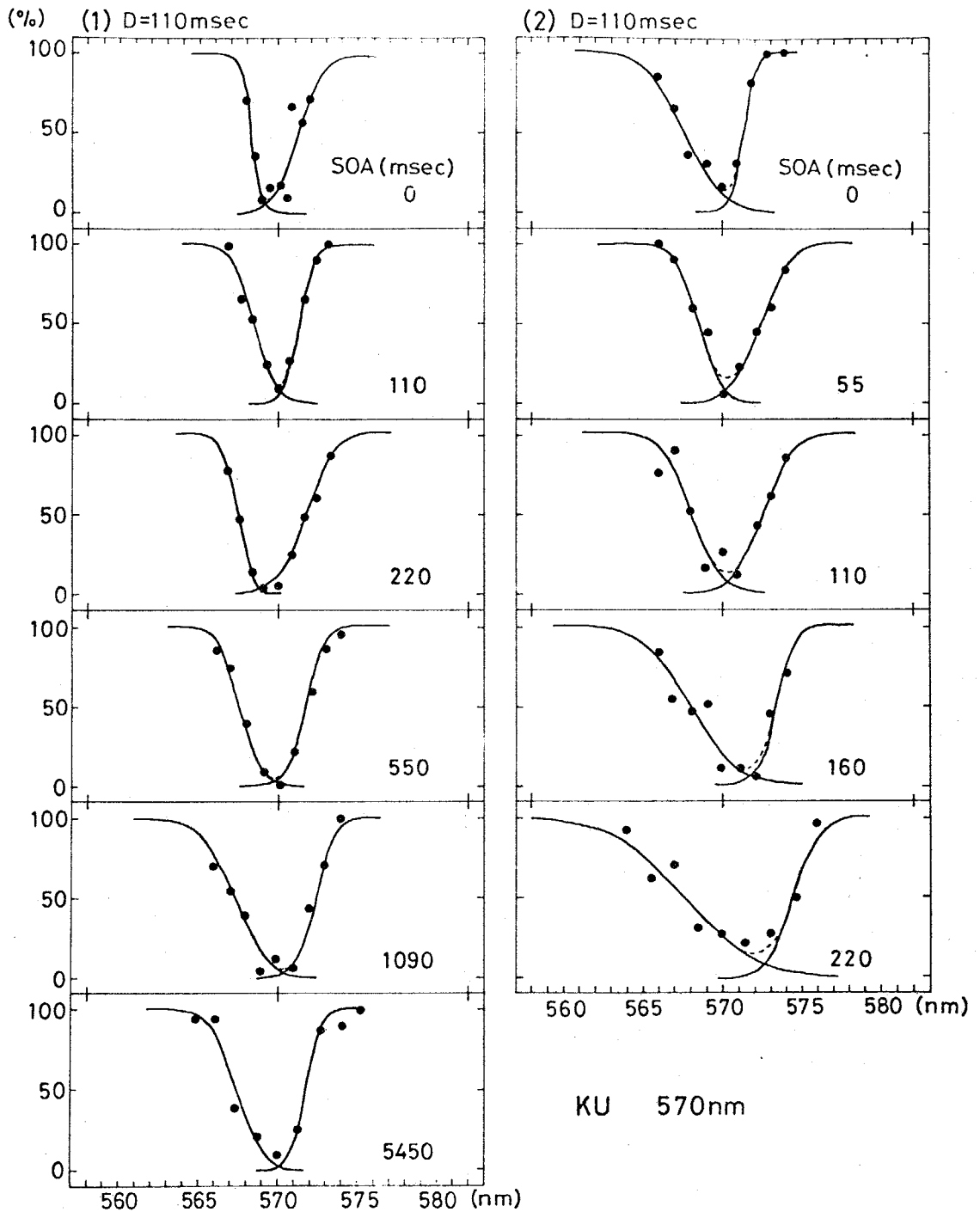


(d)

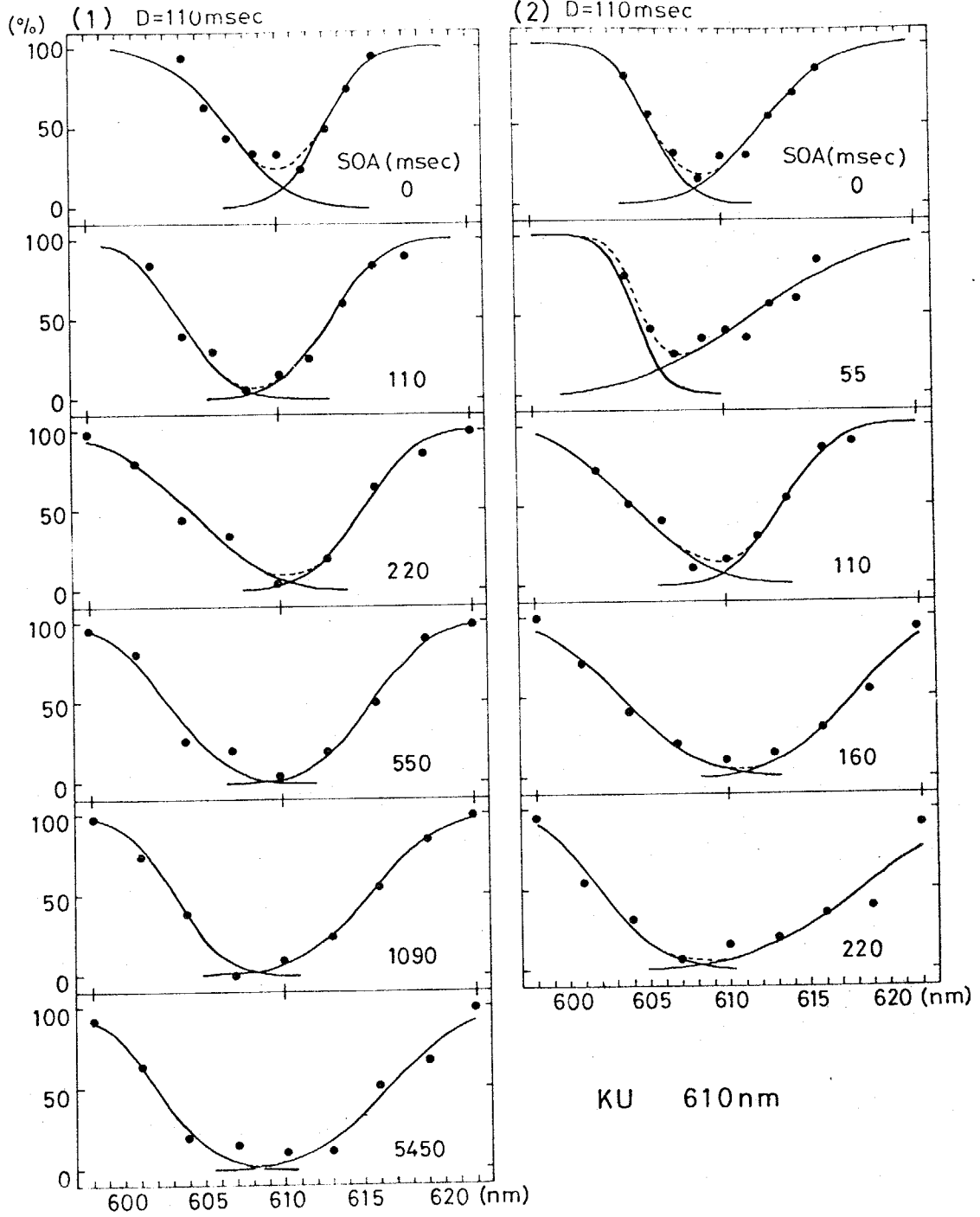


KU 520 nm

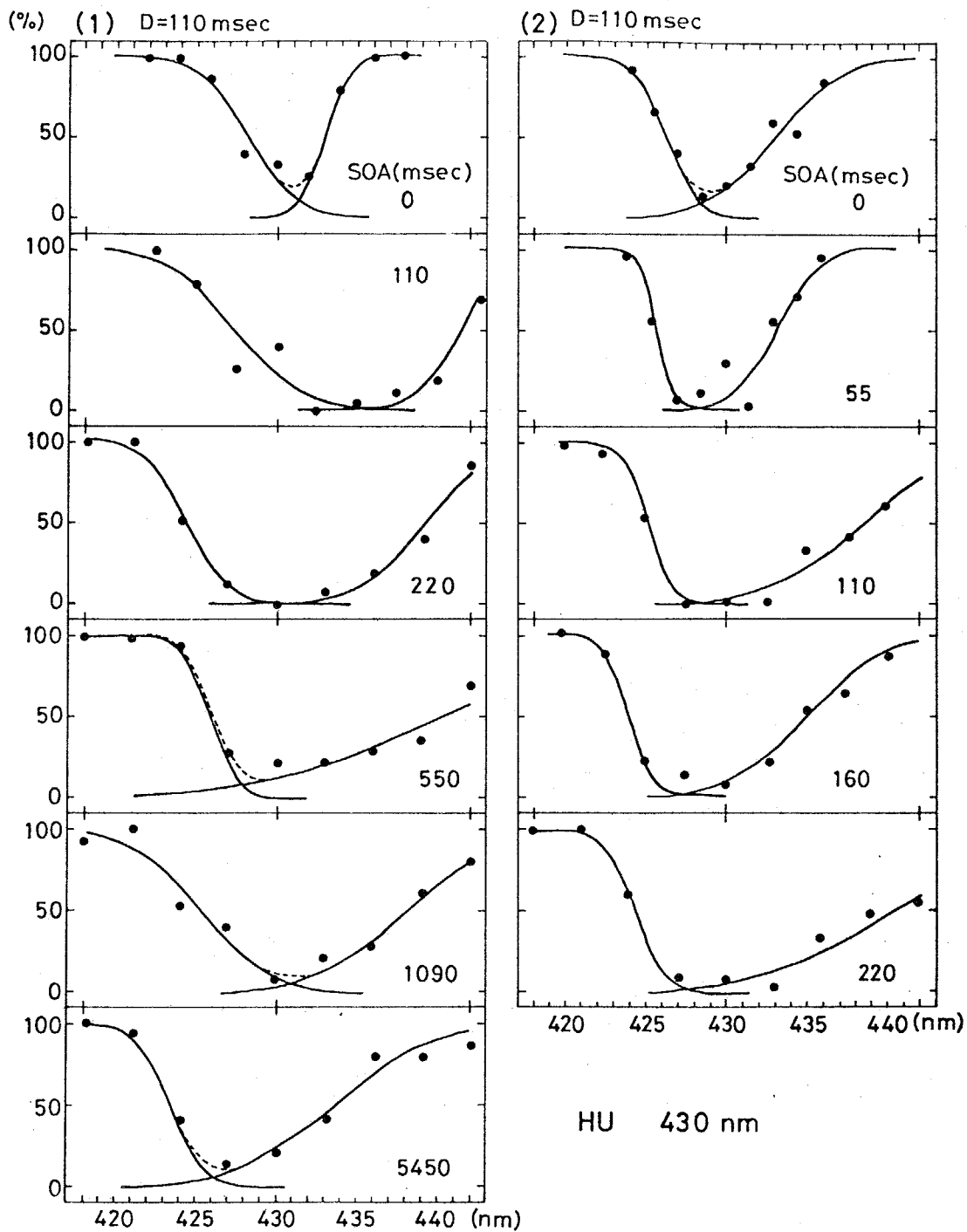
(e)



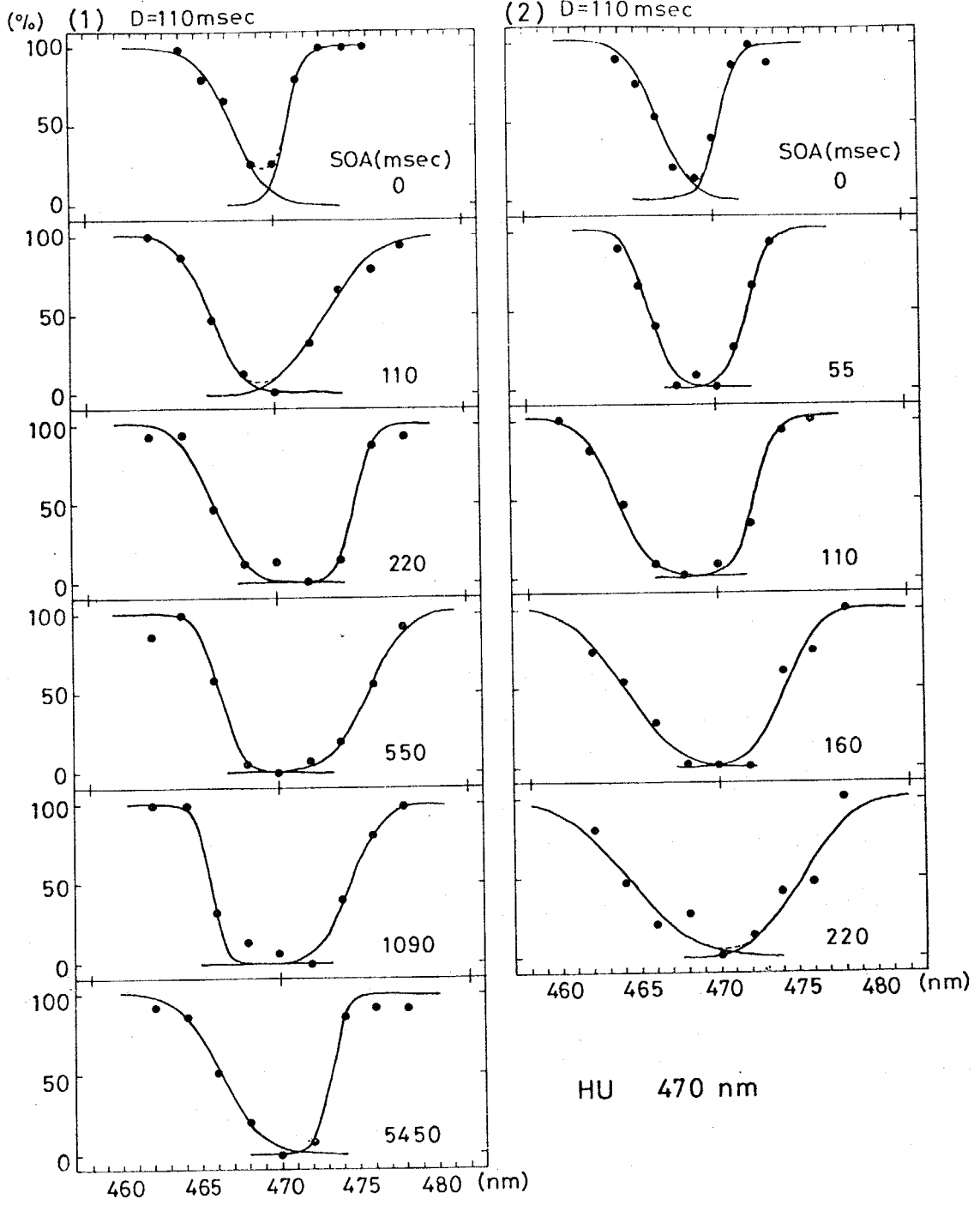
(f)



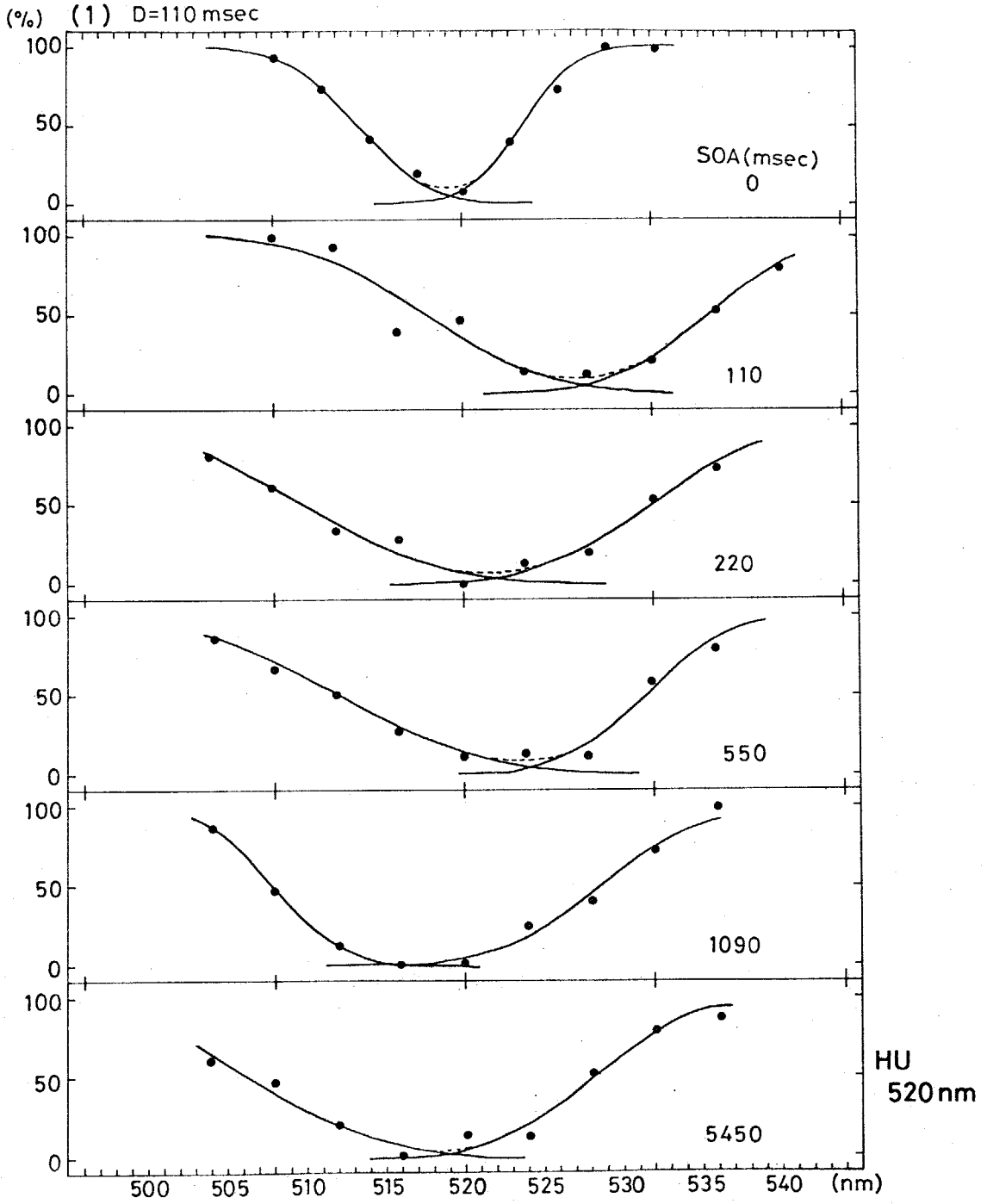
(9)



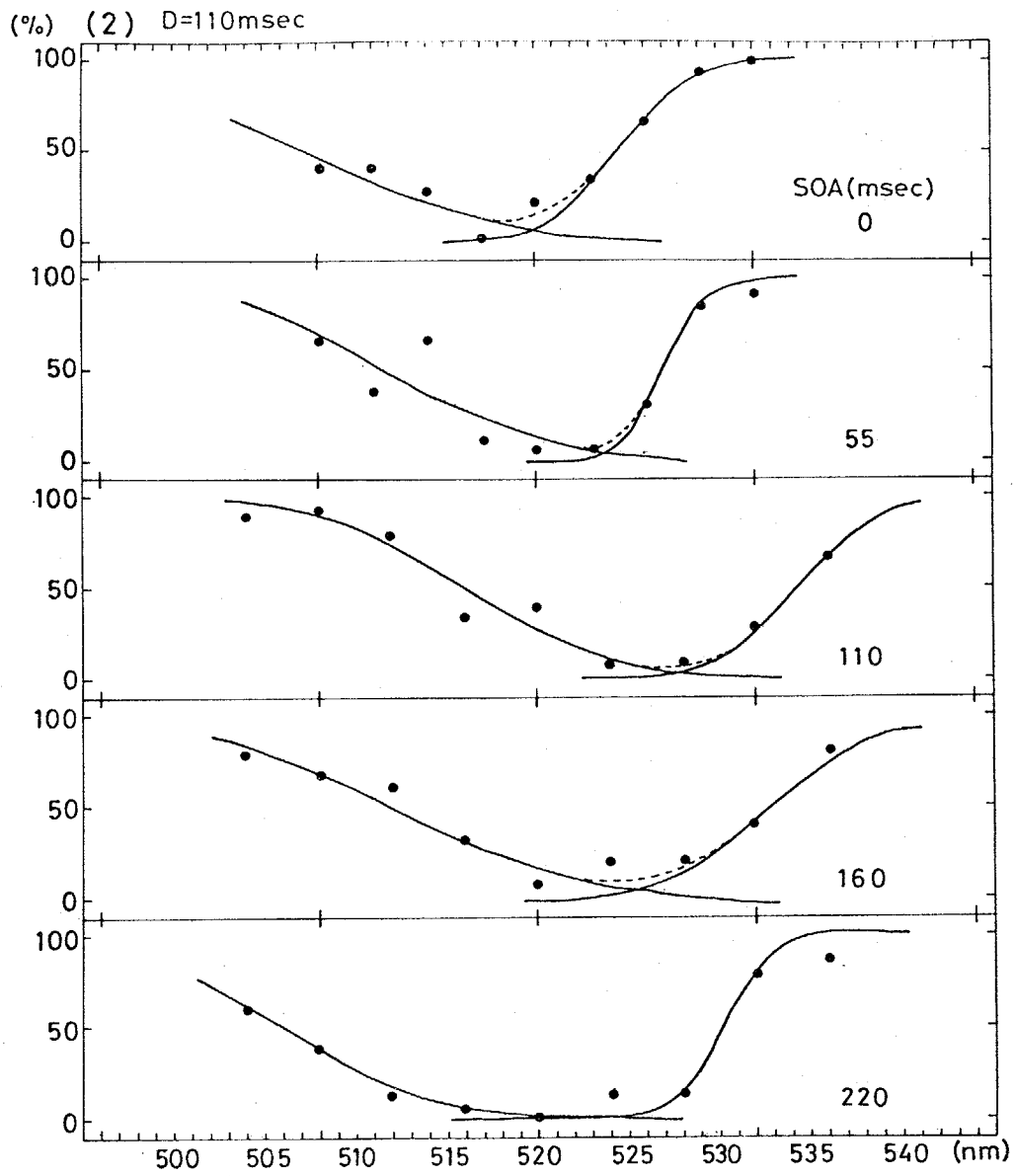
(h)



(i)

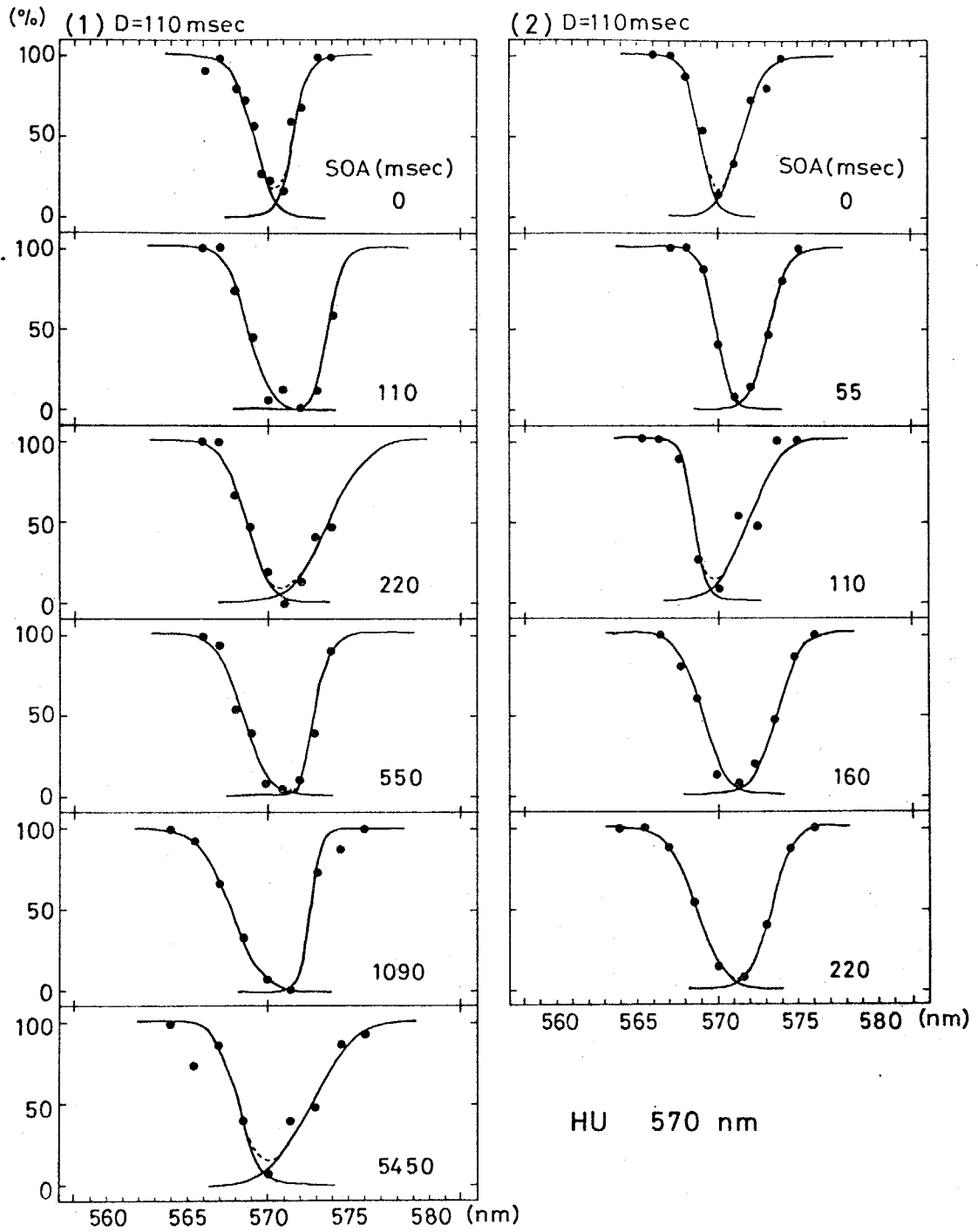


(j)

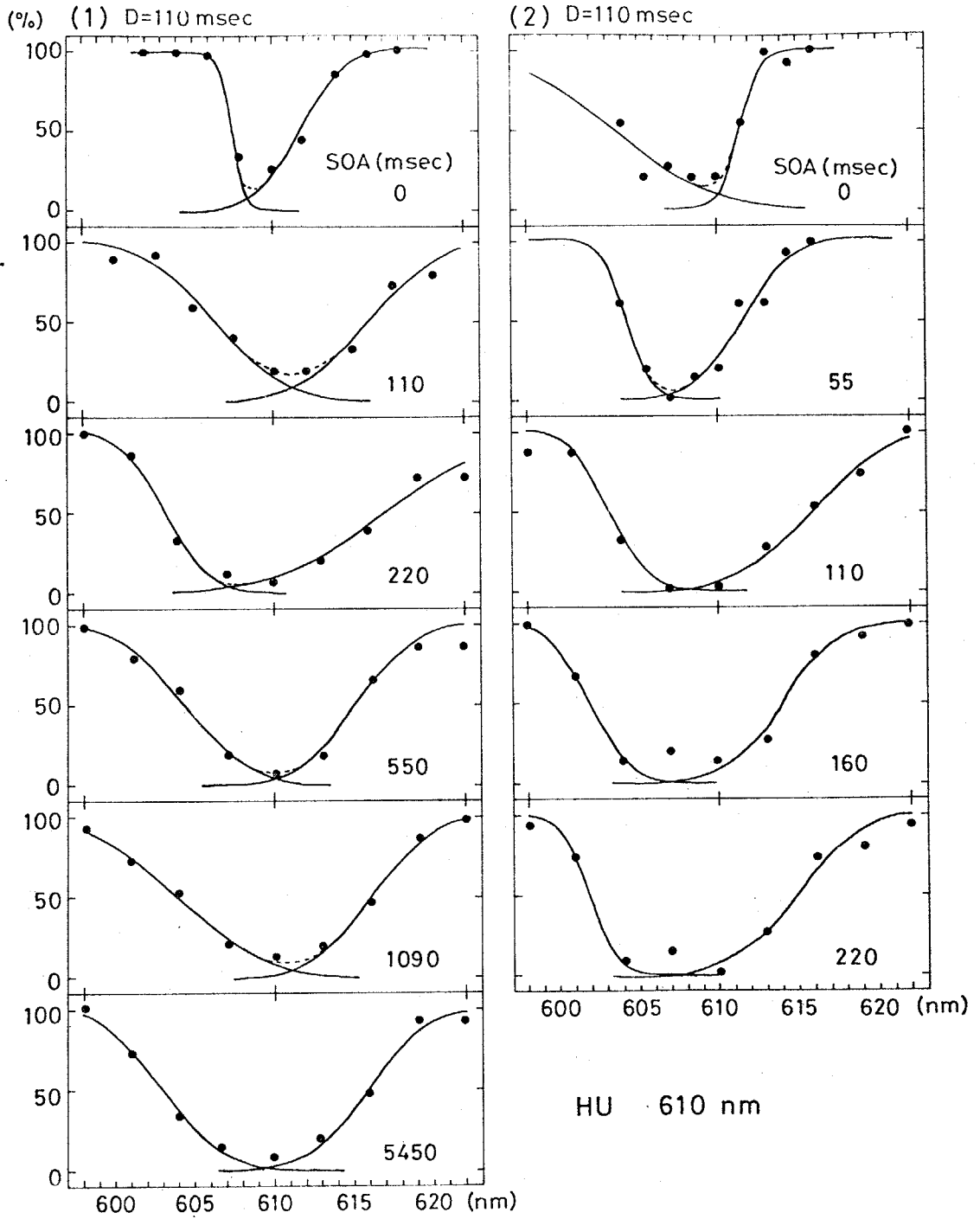


HU 520nm

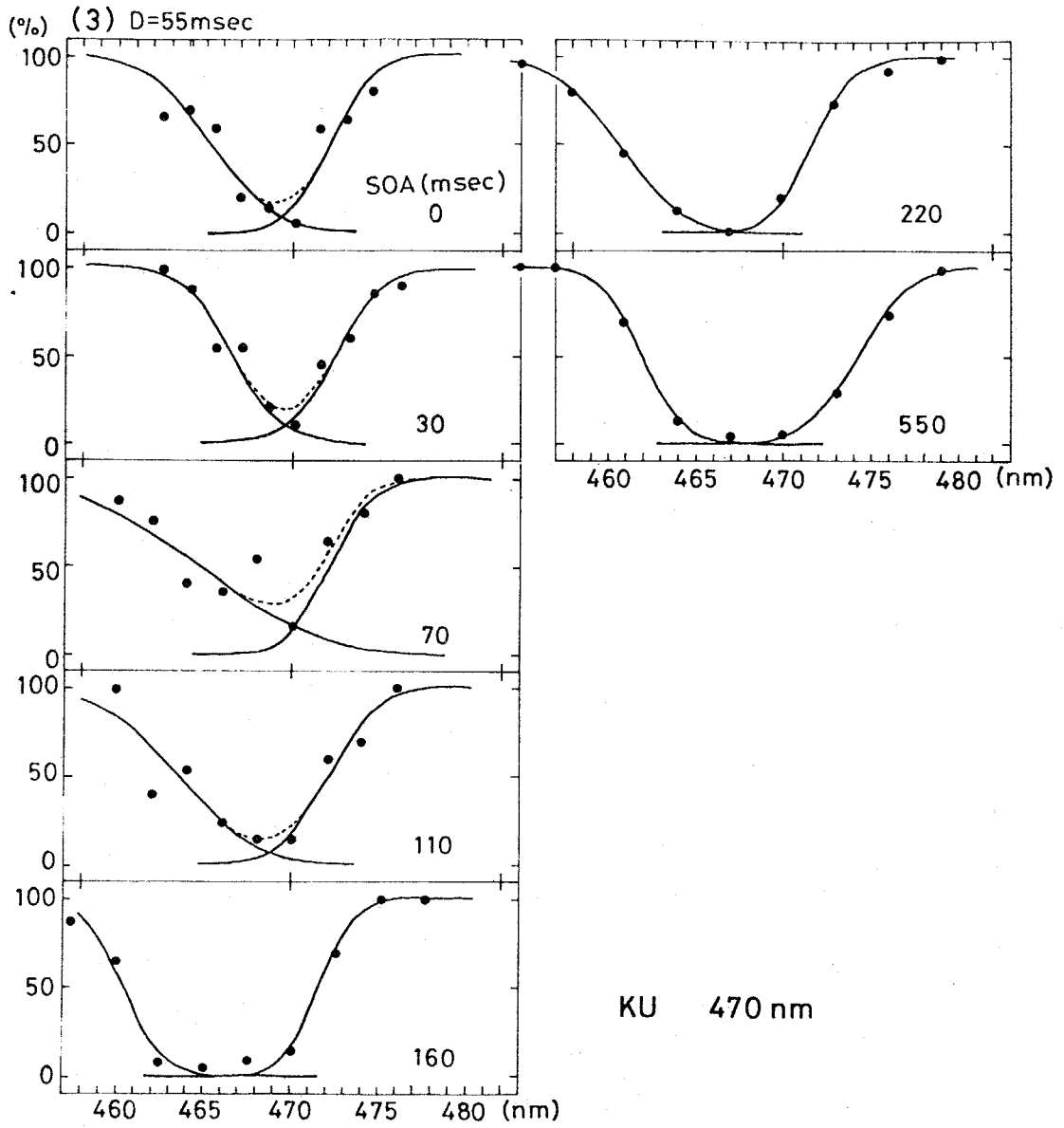
(k)



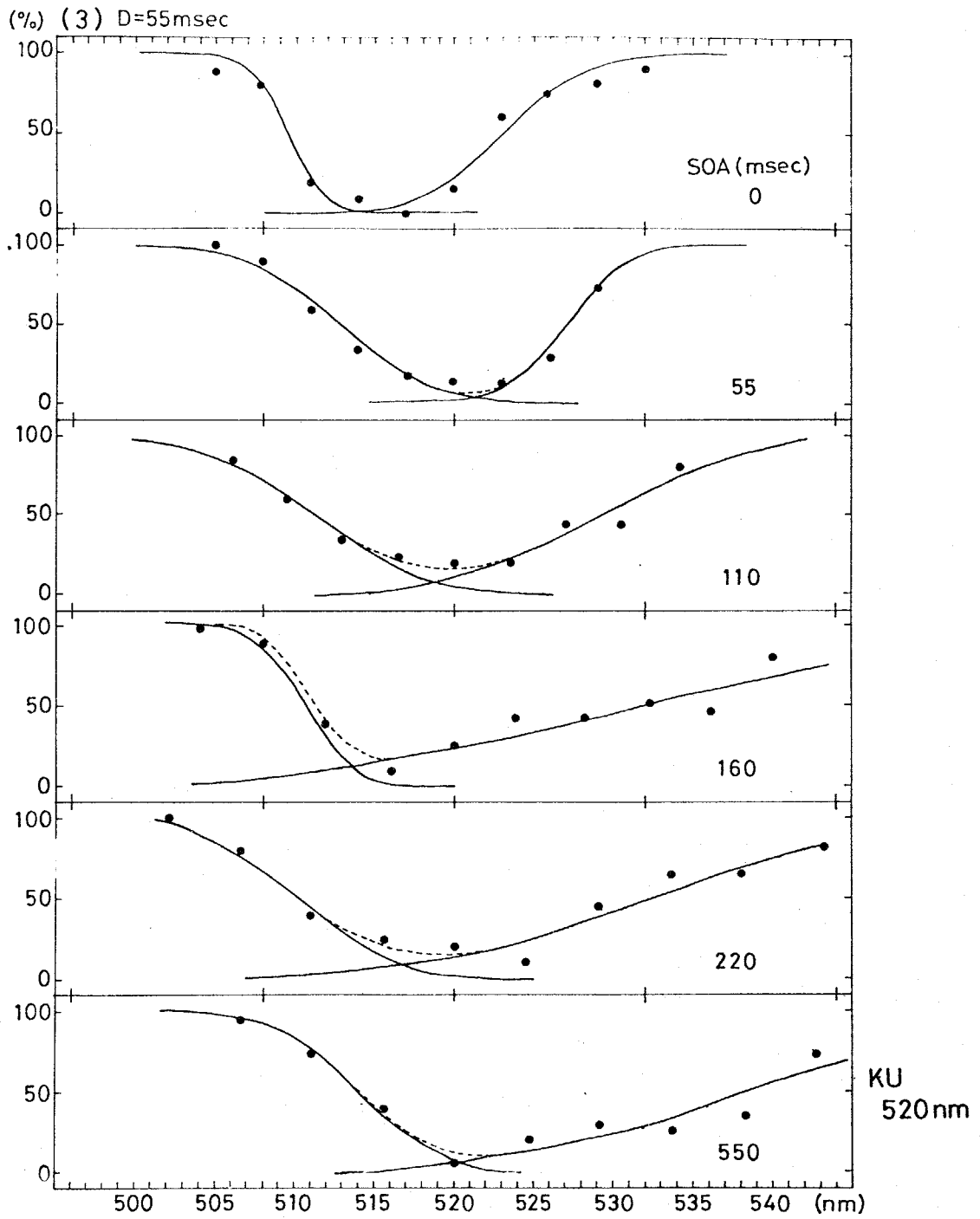
(b)



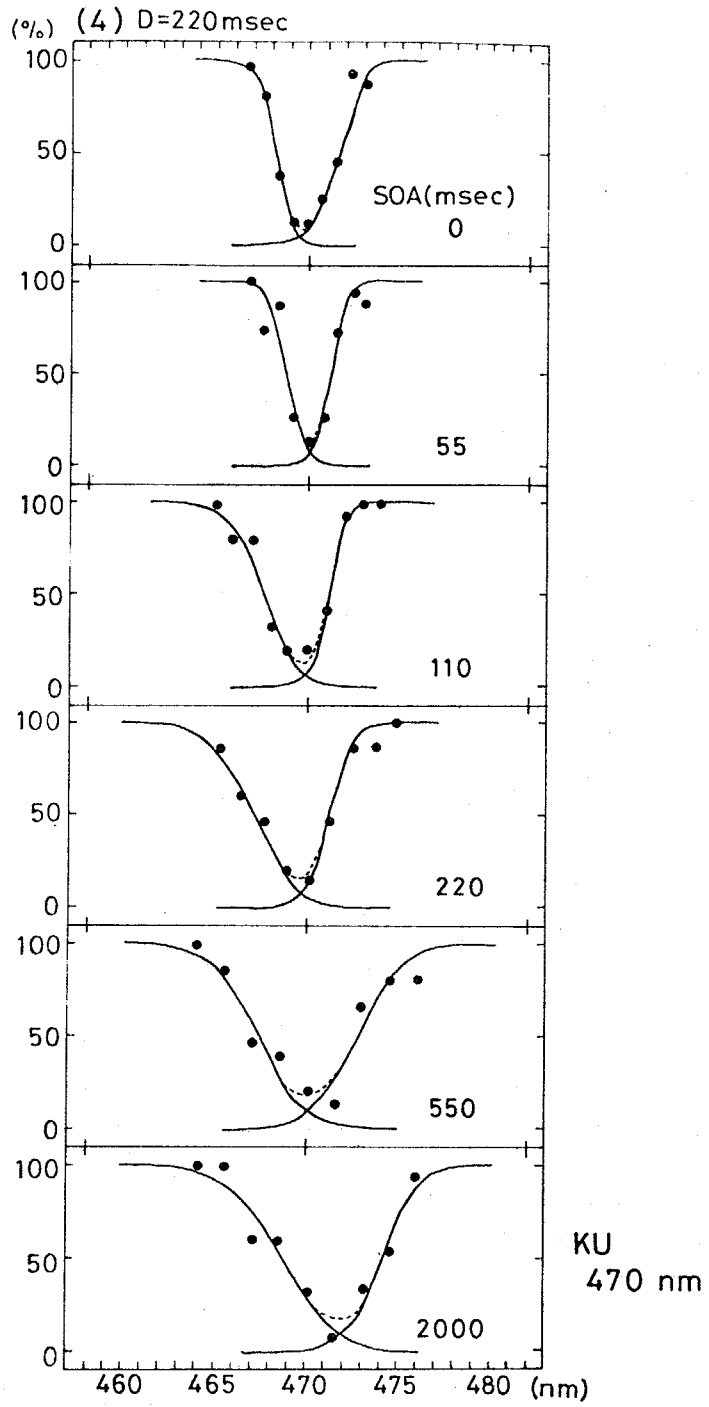
(m)



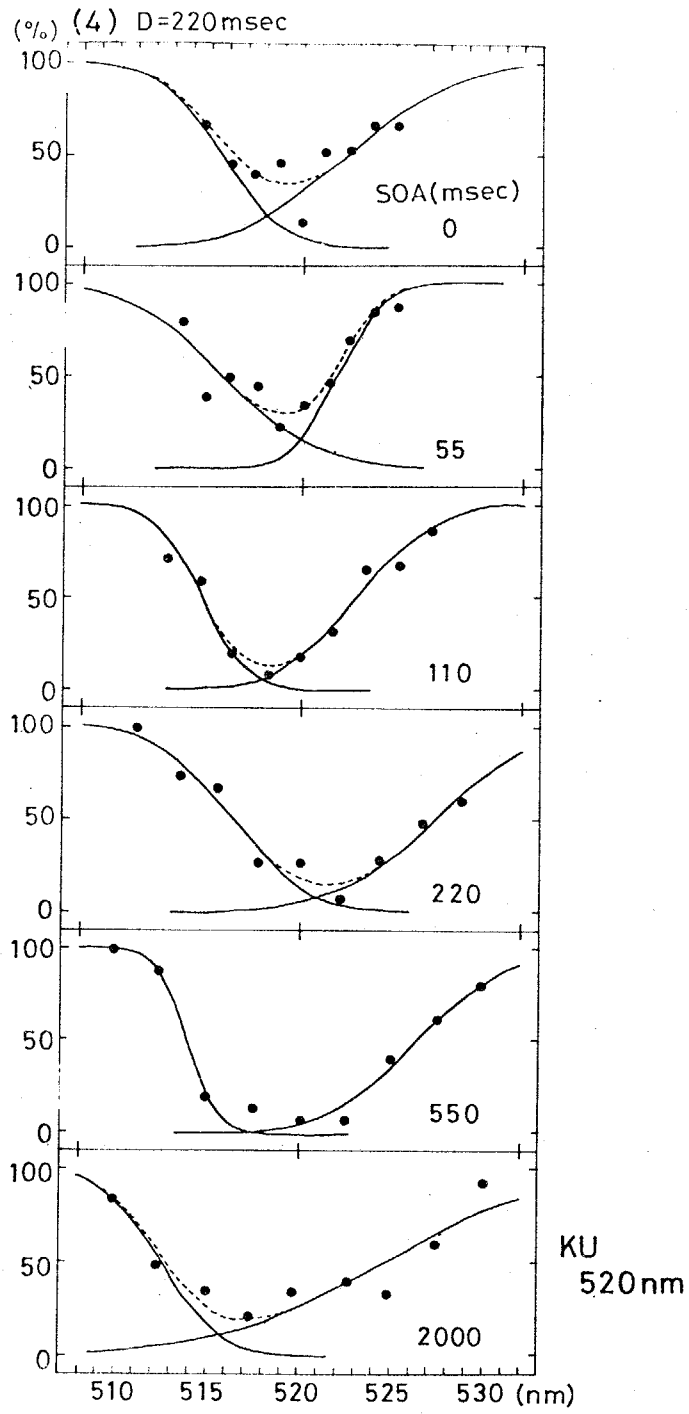
(h)



(D)



(P)



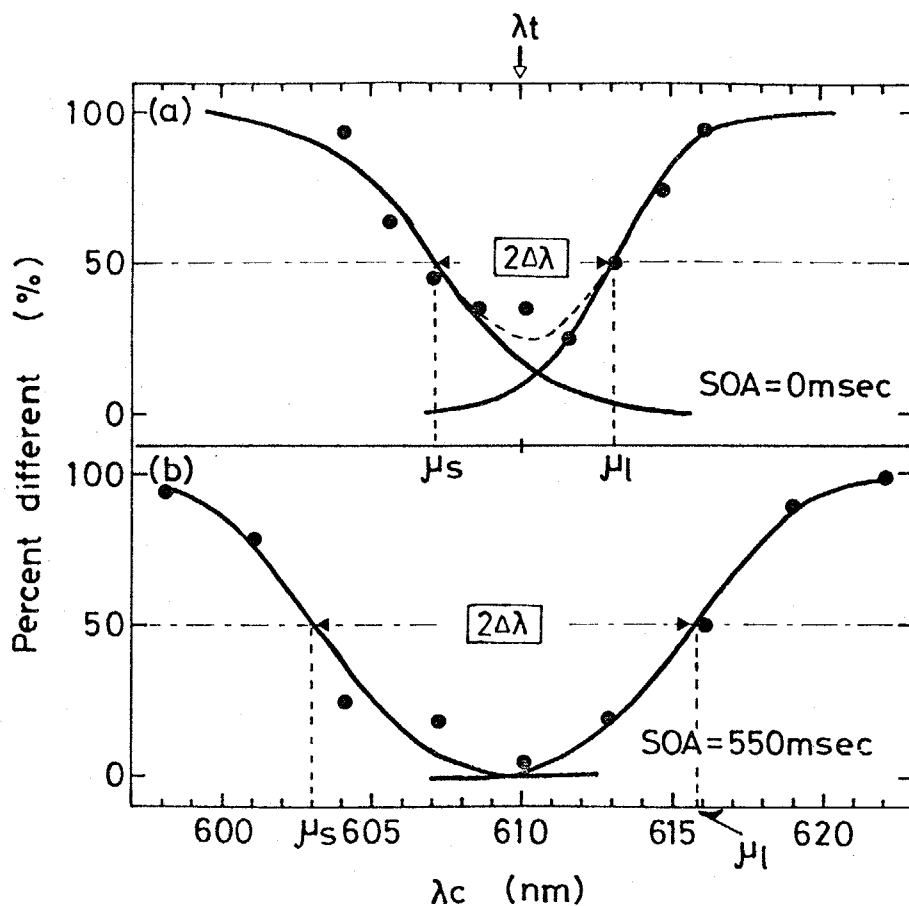


Fig. 3.8 Fig. 3.7 から選んだ被験者の応答結果の例。波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ は縦軸 50% の点で 2本の応答曲線を切り、その 2交点の距離の $1/2$ の値とある。

Fig. 3.8 には応答結果の説明のため Fig. 3.7 から選んだ例を示す。KV, 610 nm, $D=110$ msec. シリーズ(1)の結果の中から $SOA=0$ msec (a), $SOA=550$ msec (b) の場合を選んでいる。まず、 $SOA=0$ msec の結果をみると $\lambda_c=604$ および 616 nm で被験者はほとんど違うと応答し $\lambda_c=611.5$ nm で違う応答が最も少なくなっている。つまり、 λ_c が λ_t から離れると 2刺激の違いがよくわかり、近づくと 2刺激は同じに見えるということが表われている。次に $SOA=550$ msec の場合は $SOA=0$ msec の場合と異なり、 λ_c が 598 および 622 nm になって応答は 100% になり、また λ_c が 610 nm で 5% になっている。 $SOA=0$ msec の場合と比

較あると、テスト刺激と同じに見える比較刺激の波長範囲が入色を中心にして明らかに広がっていることが認められる。

被験者の“違う”という応答には比較刺激がテスト刺激に対して、その長波長側の色として違って見えた場合と、短波長側の色として違って見えた場合の二通りの場合があり、この二つの場合の和が違うという一つの応答になっていると考えられる。図中の2本の曲線はこの二つの場合にそれぞれ対応させて考えた累積正規分布曲線であり、この2本の曲線の和(図中の破線)が実測値に最適に合うように最小二乗法を用いて求めたものである。曲線はそれぞれ

$$\text{右側: } P_L(\lambda) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lambda} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-\mu_L)^2}{\sigma_L^2}\right) dt$$

$$\text{左側: } P_S(\lambda) = 1 - \frac{1}{\sigma_S \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lambda} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(t-\mu_S)^2}{\sigma_S^2}\right) dt$$

で表わされ破線 $P(\lambda)$ は

$$P(\lambda) = P_L(\lambda) + P_S(\lambda)$$

である。* ただし、 $P_L(\lambda)$ 、 $P_S(\lambda)$ の中心(正規分布の平均値)及び傾き(正規分布の標準偏差)をそれぞれ μ_L 、 μ_S 、 σ_L 、 σ_S とある。

Fig. 3.8(a) で λ_c が入色に等しいところでの応答が 35% となり、0% にならないのは2本の曲線が示すように全呈示のうち 7% の比較刺激はテスト波長よりも長波長側の色に見える。また 17% は短波長側の色に見えるためであると考えられる。(b) では2本の曲線が互いに、左右に離れているため、破線は実線に重なって表われていない。

[閾値 $\Delta\lambda$ の決め方]

波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ は応答結果の縦軸 50% の点で2本の応答曲線を切り、その2交点の距離の $1/2$ の値とある。おなわち次式で表わされる。

* 2本の累積正規分布曲線とデータにフィットさせる具体的な方法は付録 IV に示す。

$$\Delta\lambda = (\mu_l - \mu_s) / 2$$

ただし、 μ_l , μ_s はそれぞれ、長波長側、短波長側の交点を表わす。この式は長波長側、短波長側の弁別閾値をそれぞれ $\Delta\lambda_l = \mu_l - \lambda_c$, $\Delta\lambda_s = \mu_s - \lambda_c$ とした場合に

$$\Delta\lambda = (\Delta\lambda_l - \Delta\lambda_s) / 2$$

となり、 $\Delta\lambda$ は両側の弁別閾値の平均値ということになる。

Fig. 3.7で示したおべての結果について求めた波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ を $\Delta\lambda_l$, $\Delta\lambda_s$ および、右側、左側の応答曲線の傾きを表わす、標準偏差 σ_l , σ_s と共に Table 3.2 に示す。

〔 $\Delta\lambda$ -T 関数〕

$\Delta\lambda$ 値を各SOAに対して、プロットした図が Fig. 3.9である。横軸はSOA(T)を対数軸上に、縦軸は $\Delta\lambda$ の値を表わしている。呈示持続時間Dは110 msecである。黒シンボルは、比較的広い範囲のSOAをカバーするためのシリーズ(1)、白シンボルは、 $\Delta\lambda$ の急激な変化の所を詳しく調べるためのシリーズ(2)の結果である。各テスト波長の測定点に沿って引いてある直線は後述する方法で求めた、結果の近似関数である。図は被験者別に、また見やすくするために上下にシフトして描いてある。

$\Delta\lambda$ の値はどの波長でもSOAが増加すると増大する傾向にある。しかし、増大のし方は一様ではない。例えばKU, 470 nmの結果をみると、シリーズ(1)ではSOA=0 msecで $\Delta\lambda$ 値は最小、SOAが110, 220 msecと増加すると、 $\Delta\lambda$ 値は増大し、SOAが220 msec以上ではほぼ一定となっている。また、シリーズ(2)ではSOA=0.55 msecでは $\Delta\lambda$ の値はほとんど変化なく、その後SOA=220 msecまでは $\Delta\lambda$ 値は増大していく。この傾向はKUの他の波長、およびHUのおべての波長についても見られるものである。ただし、KU, 430 nm, 610 nmではSOA=5450 msecでも $\Delta\lambda$ 値はまた増加の傾向にあり、またHU, 430 nm, 470 nmではSOA=1090, 5450

KU (2)

SOA (msec)	λ (nm)															
	430			470			520			570			610			
	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$
0	0.4499	-2.5332	1.5703	-2.6783	0.7874	-6.5271	1.3960	-2.3053	2.6970	2.6970	2.6970	-4.3436	2.6970	2.6970	2.6970	-4.3436
55	1.8203	-1.3032	1.2572	-2.2185	1.8955	-5.7904	2.4324	-1.5187	2.0754	2.0754	2.0754	-5.4036	2.0754	2.0754	2.0754	-5.4036
110	1.3874	-3.5037	1.7007	-5.8838	6.0277	-5.4101	2.5343	-1.9920	3.6257	3.6257	3.6257	-5.8326	3.6257	3.6257	3.6257	-5.8326
160	2.8493	-3.4581	1.6362	-6.5036	7.1277	-4.4110	3.3569	-2.0885	7.8816	7.8816	7.8816	-6.6367	7.8816	7.8816	7.8816	-6.6367
220	3.1653	-3.8201	2.6080	-6.8158	7.7989	-5.7004	4.4312	-2.3993	8.1826	8.1826	8.1826	-8.1093	8.1826	8.1826	8.1826	-8.1093
0	1.2862	0.4574	1.2959	2.8216	3.8368	1.4882	0.6208	1.9213	3.3557	3.3557	3.3557	1.9909	3.3557	3.3557	3.3557	1.9909
55	1.0862	1.5824	0.8729	1.7749	7.4146	2.9227	1.5436	1.1850	5.9972	5.9972	5.9972	1.4816	5.9972	5.9972	5.9972	1.4816
110	1.4350	0.9657	1.5961	3.9725	7.2899	2.1314	1.4939	1.4587	2.6143	2.6143	2.6143	3.8454	2.6143	2.6143	2.6143	3.8454
160	1.5101	1.7452	0.8268	4.0689	5.4349	3.4888	1.0115	2.3530	3.7487	3.7487	3.7487	3.8745	3.7487	3.7487	3.7487	3.8745
220	1.9128	1.3533	1.9558	4.5191	9.6320	3.1504	1.3227	3.7094	5.4470	5.4470	5.4470	3.1886	5.4470	5.4470	5.4470	3.1886
0	1.4916	2.1243	2.1243	2.1243	3.6573	3.6573	1.8507	1.8507	3.6573	3.6573	3.6573	3.5203	3.6573	3.6573	3.6573	3.5203
55	1.5618	1.7379	1.7379	1.7379	3.8430	3.8430	1.9756	1.9756	3.8430	3.8430	3.8430	3.7395	3.8430	3.8430	3.8430	3.7395
110	2.4456	3.7923	3.7923	3.7923	5.7189	5.7189	2.2632	2.2632	5.7189	5.7189	5.7189	4.7292	5.7189	5.7189	5.7189	4.7292
160	3.1537	4.0699	4.0699	4.0699	5.7694	5.7694	2.7227	2.7227	5.7694	5.7694	5.7694	7.2592	5.7694	5.7694	5.7694	7.2592
220	3.4927	4.7119	4.7119	4.7119	6.7497	6.7497	3.4153	3.4153	6.7497	6.7497	6.7497	8.1460	6.7497	6.7497	6.7497	8.1460

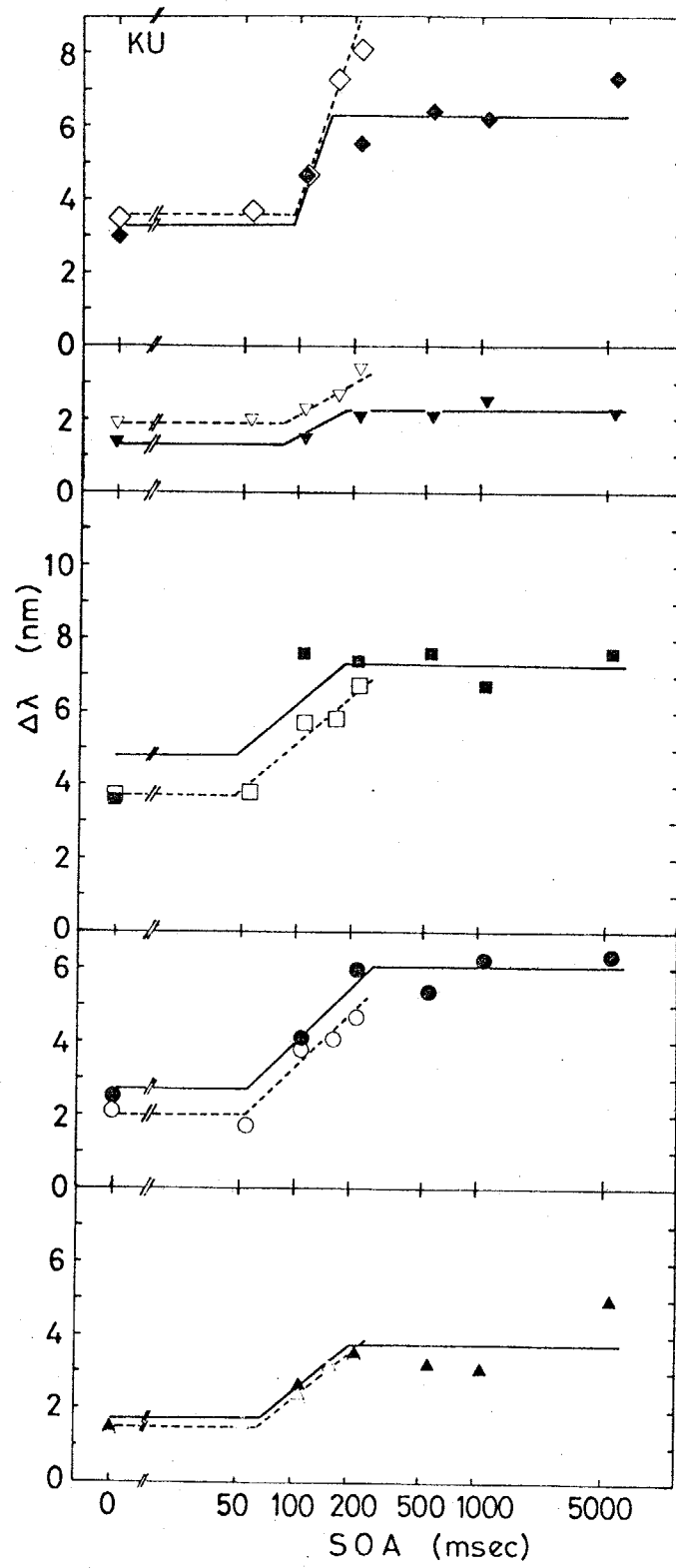
HU (1)

SOA (msec)	430				470				520				570				610			
	$\Delta\lambda_i$	$\Delta\lambda_s$	σ_i	σ_s	$\Delta\lambda_i$	$\Delta\lambda_s$	σ_i	σ_s	$\Delta\lambda_i$	$\Delta\lambda_s$	σ_i	σ_s	$\Delta\lambda_i$	$\Delta\lambda_s$	σ_i	σ_s	$\Delta\lambda_i$	$\Delta\lambda_s$	σ_i	σ_s
0	2.9778	-1.8666	0.8087	1.8390	3.9845	-6.7294	2.7694	1.8390	3.9845	-6.7294	1.5336	-1.0090	1.8049	-2.3798	0.8690	2.4617	1.8049	-2.3798	0.8690	2.4617
110	11.4861	-2.7618	3.2900	1.6558	15.7919	-2.4168	4.9124	1.6558	15.7919	-2.4168	3.8146	-1.1985	6.1396	-3.6314	2.4729	3.4533	6.1396	-3.6314	2.4729	3.4533
220	9.2216	-5.6694	5.0010	1.7396	12.0963	-10.2826	5.5891	1.7396	12.0963	-10.2826	3.9269	-1.2231	7.1267	-6.8149	0.9029	2.0714	7.1267	-6.8149	0.9029	2.0714
550	10.3869	-4.1469	5.8616	1.0994	11.7005	-8.1071	4.1494	1.0994	11.7005	-8.1071	3.1431	-1.5183	5.1723	-5.5610	1.9028	1.4307	5.1723	-5.5610	1.9028	1.4307
1090	8.1499	-4.7267	4.5264	0.7691	8.5755	-12.1997	5.0404	0.7691	8.5755	-12.1997	2.7011	-2.2501	6.0013	-6.0058	1.5819	3.5019	6.0013	-6.0058	1.5819	3.5019
5450	3.7057	-6.5461	3.1557	2.0663	8.1583	-13.5990	4.9630	2.0663	8.1583	-13.5990	2.6663	-1.9134	5.8100	-7.0603	0.7610	1.7398	5.8100	-7.0603	0.7610	1.7398
0	1.3032	2.4617	0.8690	1.8390	2.7694	3.6931	2.7694	1.8390	2.7694	3.6931	0.7626	1.0497	2.3031	0.6659	0.7626	1.0497	2.3031	0.6659	0.7626	1.0497
110	2.1983	3.4533	2.4729	1.6558	4.9124	6.0659	4.9124	1.6558	4.9124	6.0659	0.7302	1.0699	3.5179	3.5953	0.7302	1.0699	3.5179	3.5953	0.7302	1.0699
220	3.1720	2.0714	0.9029	1.7396	5.5891	6.9372	5.5891	1.7396	5.5891	6.9372	1.8468	1.1954	5.4602	2.1509	1.8468	1.1954	5.4602	2.1509	1.8468	1.1954
550	8.5599	1.4307	1.9028	1.0994	4.1494	7.5016	4.1494	1.0994	4.1494	7.5016	0.7379	1.2859	2.9183	3.2646	0.7379	1.2859	2.9183	3.2646	0.7379	1.2859
1090	4.4896	3.5019	1.5819	0.7691	5.0404	3.5429	5.0404	0.7691	5.0404	3.5429	0.4893	1.5796	2.9922	4.3051	0.4893	1.5796	2.9922	4.3051	0.4893	1.5796
5450	5.0832	1.7398	0.7610	2.0663	4.9630	6.6043	4.9630	2.0663	4.9630	6.6043	2.0775	1.1534	2.9433	3.0220	2.0775	1.1534	2.9433	3.0220	2.0775	1.1534
0	2.4322	7.1240	1.6512	3.7122	5.3570	9.1044	5.3570	3.7122	5.3570	9.1044	1.2713	2.5066	2.0924	4.8855	1.2713	2.5066	2.0924	4.8855	1.2713	2.5066
110	7.1240	7.4455	4.4923	4.4923	11.1695	9.9038	11.1695	4.4923	11.1695	9.9038	2.5750	2.3307	6.9708	5.3667	2.5750	2.3307	6.9708	5.3667	2.5750	2.3307
220	7.4455	7.2669	4.7856	4.7856	9.9038	10.3876	9.9038	4.7856	9.9038	10.3876	2.4756	2.4756	6.0036	6.0036	2.4756	2.4756	6.0036	6.0036	2.4756	2.4756
550	7.2669	6.4383	4.4257	4.4257	10.3876	10.8787	10.3876	4.4257	10.3876	10.8787	2.2899	2.2899	6.4352	6.4352	2.2899	2.2899	6.4352	6.4352	2.2899	2.2899
1090	6.4383	5.1259	3.4860	3.4860	10.8787		10.8787	3.4860	10.8787											
5450	5.1259																			

HU (2)

SOA (msec)	λ (nm)									
	430		470		520		570		610	
	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda_s$
0	2.9865	-3.7649	0.2525	-3.6437	4.6260	-13.0018	1.5019	-1.0356	1.4881	-6.5468
55	3.1729	-4.4004	1.9237	-4.2546	6.9866	-8.3366	3.1023	-0.1878	1.5782	-5.6651
110	8.5326	-4.9368	2.4448	-6.2941	14.4102	-4.0864	1.7321	-1.6844	5.8671	-6.8818
160	5.1232	-6.0856	4.1322	-5.9783	12.7257	-7.7293	3.5810	-1.0904	4.1475	-8.1022
220	10.4729	-5.6131	5.1933	-5.9056	10.2783	-14.1697	3.2791	-1.4284	4.8221	-8.1147
	δ_l	δ_s	δ_l	δ_s	δ_l	δ_s	δ_l	δ_s	δ_l	δ_s
0	3.4342	1.5982	0.8677	1.7252	3.2405	8.7450	1.1916	0.7273	1.0266	4.9947
55	2.1799	0.8980	1.0843	1.2446	1.9206	7.4621	0.9963	0.7255	2.4158	1.2678
110	4.6115	1.2769	1.1013	1.7849	3.6533	6.5250	1.6033	0.6447	3.8132	1.9574
160	3.9232	1.2988	1.8094	2.6876	4.6196	8.5837	1.2174	1.2101	2.8586	2.0682
220	6.5953	1.5202	2.5683	3.2762	2.1686	6.4415	1.0939	1.3332	3.3638	1.4540
	$\Delta\lambda$ (nm)									
0	3.3757	1.9481	1.9481	8.8139	8.8139	1.2685	4.0175		4.0175	
55	3.7867	3.0892	3.0892	7.6616	7.6616	1.6451	3.6217		3.6217	
110	6.7347	4.3695	4.3695	9.2483	9.2483	1.7083	6.3745		6.3745	
160	5.6044	5.0553	5.0553	10.2275	10.2275	2.3357	6.1249		6.1249	
220	8.0521	5.5495	5.5495	12.2240	12.2240	2.3538	6.4684		6.4684	

(a)



(b)

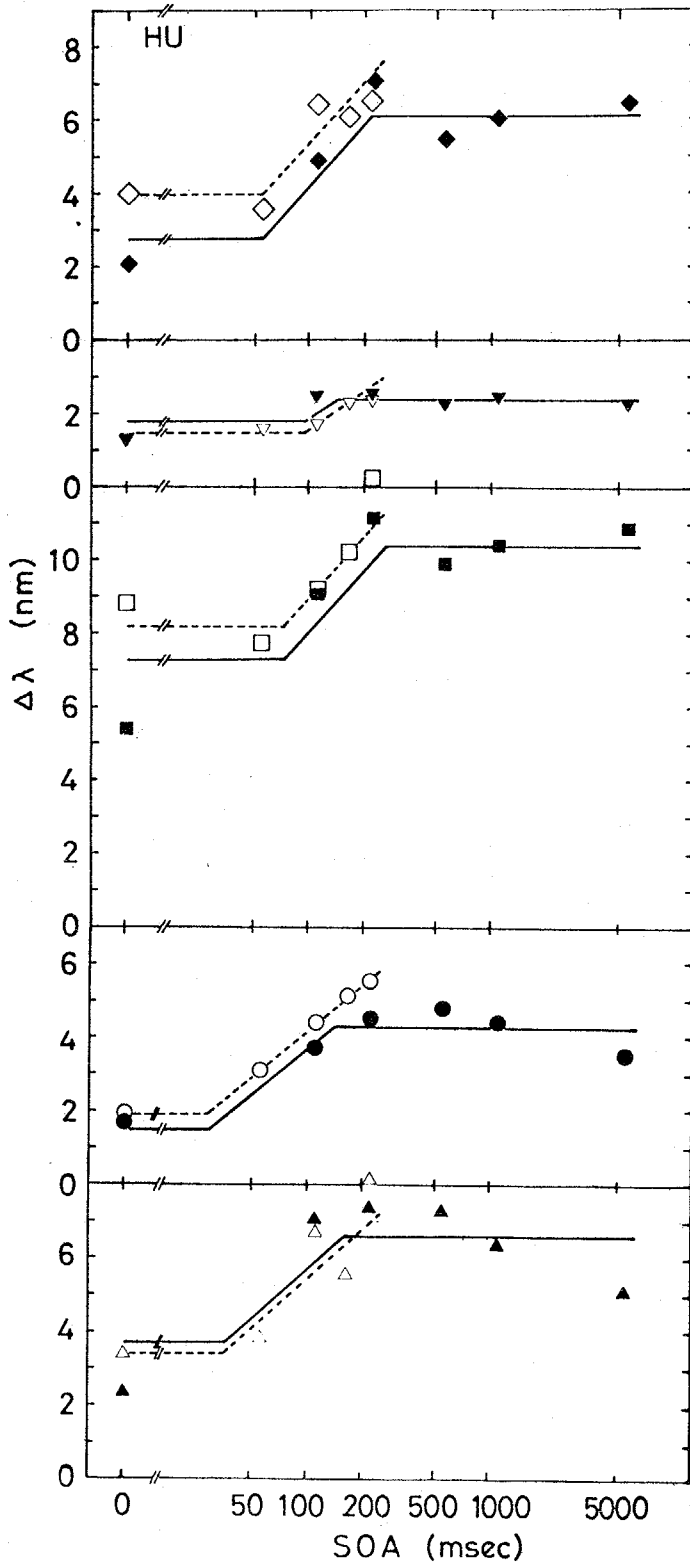


Fig. 3.9 $\Delta\lambda$ -T 関数。
 呈示開始時間遅れ SOA
 (T) に対する波長弁別閾
 値 $\Delta\lambda$ の変化を波長別に
 示す。呈示持続時間 D は
 110msec。(a)KU, (b)HU
 の結果。

- ▲, △ : 430nm,
- , ○ : 470nm,
- , □ : 520nm,
- ▼, ▽ : 570nm,
- ◆, ◇ : 610nm.

黒シンボルがシリーズ(1),
 白シンボルがシリーズ(2)
 である。図中の実線と破
 線は最適近似関数を表わ
 す。詳細は本文参照。

msec とやや減少の傾向にある。これは上述した一般的傾向を示さない点であるが、同一の波長の結果と2人の被験者で比較すると、もう一方の被験者では、これらの例外的な傾向は認められず、一般性に乏しいと考えられる。シリーズ(1)の結果とシリーズ(2)の結果の $\Delta\lambda$ の値と比較すると、シリーズ(2)の値が(1)より小さい波長(KU: 430, 470, 520 nm, HU: 430, 570 nm), また大きい波長(KU: 570, 610 nm, HU: 470, 520, 610 nm)といったように系統的に一様に上下にシフトしている。このシフトの原因の一つにシリーズ(1), (2)では左右の視野の間隔 θ がそれぞれ11', 41'であり、30'の違いがあることが考えられる。視野の間隔と色弁別の関係としては、視野の間隔が0'から約50'広がっても明るさの弁別が劣化するという報告はある(Traub and Balinkin, 1961)。しかし、ここでは、2人の被験者の結果と比較すると必ずしも同一の波長で一貫した傾向がみられない。したがって、シリーズ(1), (2)での結果の差は、左右の視野の間隔の違いに起因するというよりも、むしろ、実験日時による偏差(day-to-day change) (池田, 1975)が原因と考えられる。

〔結果の近似関数〕

さて、次に Fig. 3.9 に示した各測定点に近似関数をあてはめ、 $\Delta\lambda$ 値の SOA に対する時間的変化の特徴を各波長別に検討する。そのために、Fig. 3.10 の実線で示されるような関数と、測定点に近似する。Fig. 3.10 の横軸は、SOA (msec) の対数軸、縦軸は、波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ (nm) である。この関数は、SOA が T_0 以下では一定値 $\Delta\lambda_0$, T_0 から T_c までは直線で増大し、 T_c 以上では再び一定値 $\Delta\lambda_c$ をとり、 $T_0, T_c, \Delta\lambda_0, \Delta\lambda_c$ という4変数で $\Delta\lambda$ 値の時間的変化と特徴づけるものである。この関数は単純な関数であるが、数学的取り扱いが容易であり、Fig. 3.9 で示された測定点の傾向を表現するには充分であろう。

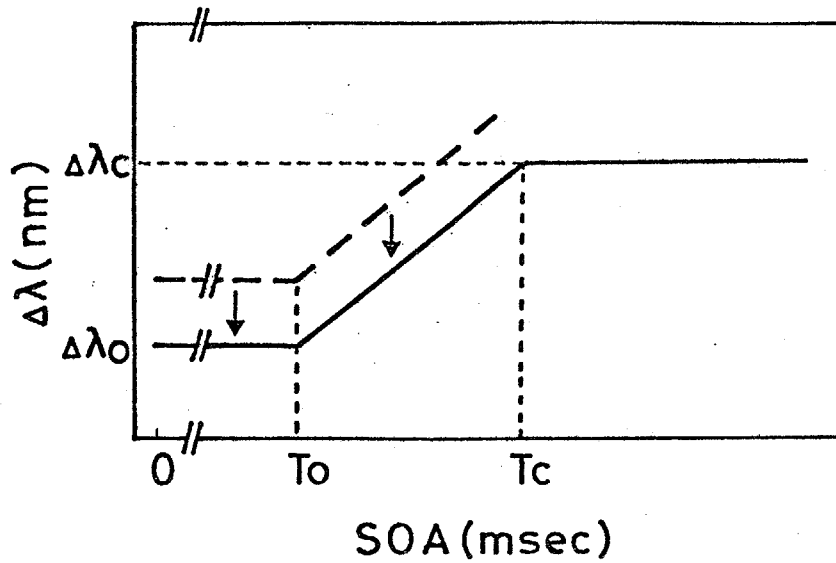


Fig. 3.10 近似関数。実験で示される関数に Fig. 3.9 の結果にあてはめる。SOA < T_c の部分は破線の関数にシリーズ(2)の結果にあてはめて形を決める。全体の実線で示される関数は破線の部分と上下にシフトしたものをシリーズ(1)の結果にあてはめて求める。

各結果の測定点にこの関数にあてはめるには、最小二乗法を用いた。D=110 msec の実験は二つのシリーズに分かれており、シリーズ(1)では SOA を 5 sec まで主に SOA の大きい範囲を細かく測定しており、シリーズ(2)では SOA を 0 から 220 msec までの範囲で細かく測定してある。そこで、まず、シリーズ(2)の結果を用いて Fig. 3.10 の破線で表わされる関数、すなわち、実線の関数のうち T_c までの部分にあてはめ、 T_0 の値を決定する。この場合、SOA が 0, 55, 110, 160 msec の 4 測定点を用い、SOA が 220 msec の測定点は T_c 以上の部分に含まれる可能性があるため除いて、関数を測定点に近似した。次に、今近似した破線の関数の形は変えずに、上下にシフトして、さらに T_c 以後の一定値の部分をつけ加え、実線の関数として、シリーズ(1)の結果にあてはめる。その結果、残りの変数 T_c , $\Delta\lambda_0$, $\Delta\lambda_c$ を決める。このようにして求めた近似関数が Fig. 3.9 に示されている実線及び破線である。

近似の結果として、求まった4変数 $T_0, T_c, \Delta\lambda_0, \Delta\lambda_c$ の値は Table 3.3 に表1として示してある。 T_0, T_c の値は関数とあてはめる際に用いた msec の対数値と共に示す。 T_0, T_c の値は波長の違いによる差は小さく、平均すると KU, HU でそれぞれ $T_0 = 66, 52 \text{ msec}$, $T_c = 190, 180 \text{ msec}$ となる。 T_0, T_c とともに HU の方が KU よりも多少小さい値となっている。

Table 3.3 近似関数の各変数 $T_0, T_c, \Delta\lambda_0, \Delta\lambda_c$ と $r(\Delta\lambda_c/\Delta\lambda_0)$ と共に示す。 T_0, T_c の上段は msec の対数値で下段が msec 値である。 表示持続時間 $D = 110 \text{ msec}$ 。

	Test wavelength λ_t (nm)					Mean
	430	470	520	570	610	
KU:						
T_0	1.82	1.74	1.66	1.91	1.97	1.82 ± 0.12
(msec)	65	55	46	81	92	
T_c	2.32	2.42	2.25	2.27	2.17	2.29 ± 0.09
(msec)	210	270	180	190	150	
$\Delta\lambda_0$ (nm)	1.67	2.73	4.79	1.27	3.31	
$\Delta\lambda_c$ (nm)	3.73	6.04	7.31	2.24	6.35	
$r(\Delta\lambda_c/\Delta\lambda_0)$	2.23	2.21	1.53	1.76	1.92	1.93 ± 0.30
HU:						
T_0	1.55	1.46	1.86	1.97	1.74	1.72 ± 0.21
(msec)	36	29	73	94	55	
T_c	2.20	2.14	2.41	2.15	2.34	2.25 ± 0.12
(msec)	160	140	260	140	220	
$\Delta\lambda_0$ (nm)	3.68	1.48	7.32	1.76	2.79	
$\Delta\lambda_c$ (nm)	6.57	4.30	10.39	2.42	6.12	
$r(\Delta\lambda_c/\Delta\lambda_0)$	1.78	2.90	1.42	1.37	2.19	1.93 ± 0.63

[表示持続時間 D の影響]

Table 3.2 に示されるシリーズ (3), (4) の $D = 55, 220 \text{ msec}$ の波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ を Fig. 3.11 に示す。 上が 470 nm , 下が 520 nm で

の結果である。同一の波長の $D=110\text{ msec}$ の結果も比較のために再プロットしてある。図より、 $\Delta\lambda$ 値の大きさは全ての SOA でほぼ一様に D が増加すると減少していくが、 $D=55, 220\text{ msec}$ の場合又は $\Delta\lambda$ 値の SOA に対する時間変化の一般的傾向は $D=110\text{ msec}$ の場合と等しいことが認められる。すなわち $\Delta\lambda$ 値は $\text{SOA}=55\text{ msec}$ までは一定、その後増大し、 $\text{SOA}=220\text{ msec}$

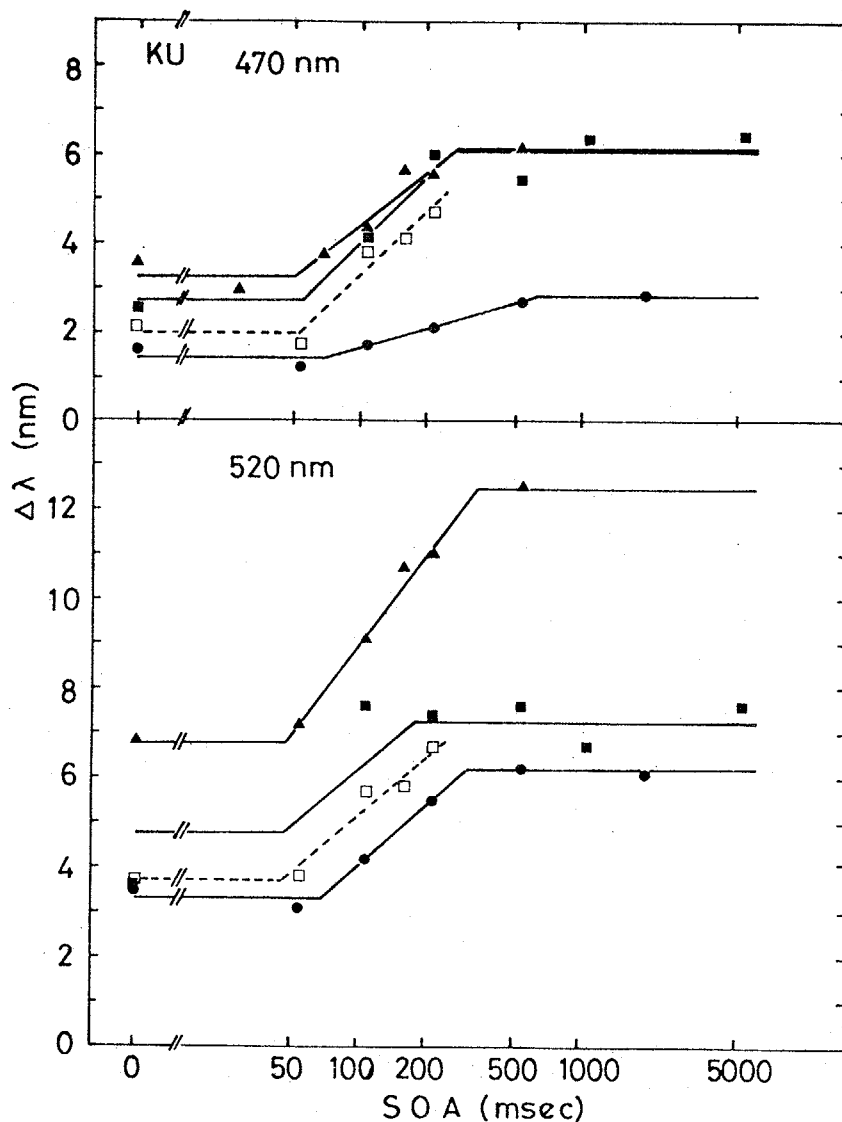


Fig. 3.11 $\Delta\lambda$ - T 関数に対する表示持続時間 D の影響。 $D=55$ (\blacktriangle), 110 (\blacksquare , \square), 220 (\bullet) msec. $D=110\text{ msec}$ の結果は Fig. 3.9 から再プロットした。

から 550 msec の範囲で再び一定値になる傾向にある。ただし、 $D=55$ msec の 520 nm の場合は、 $SOA=550$ msec になっても $\Delta\lambda$ の値はまだやや増加の傾向にある。図甲の実線は Fig. 3.10 に示される実線の近似関数とやはり最小二乗法であてはめたものである。ただしこの場合は $D=110$ msec の場合と異なり一つのシリーズで SOA の全ての点の測定を行っているため、

Fig. 3.10 の破線の関数は用いずに実線のみを使用した。Table 3.4

Table 3.4 $D=55, 220$ msec の場合の近似関数の各変数 $T_0, T_c, \Delta\lambda_0, \Delta\lambda_c$ と比 $r (\Delta\lambda_c/\Delta\lambda_0)$ と共に示す。 T_0, T_c の上段は msec の計数値、下段は msec 値である。被験者 KU。

	Test wavelength λ_t (nm)		
	470	520	Mean
$D=55$ msec			
T_0	1.72	1.68	1.70 ± 0.03
(msec)	52	48	50
T_c	2.44	2.54	2.49 ± 0.07
(msec)	270	340	310
$\Delta\lambda_0$ (nm)	3.19	6.85	
$\Delta\lambda_c$ (nm)	6.13	12.52	
$r(\Delta\lambda_c/\Delta\lambda_0)$	1.92	1.83	1.87 ± 0.07
$D=220$ msec			
T_0	1.84	1.83	1.83 ± 0.01
(msec)	69	67	68
T_c	2.77	2.49	2.63 ± 0.20
(msec)	580	310	420
$\Delta\lambda_0$ (nm)	1.40	3.30	
$\Delta\lambda_c$ (nm)	2.76	6.18	
$r(\Delta\lambda_c/\Delta\lambda_0)$	1.97	1.87	1.92 ± 0.07

には $D=55, 220$ msec の場合の $T_0, T_c, \Delta\lambda_0, \Delta\lambda_c$ の値が示されている。 $D=55, 220$ msec の場合、共に T_0 の値は $D=110$ msec の場合とほとんど変化がないが、 T_c の値は両者共に $D=110$ msec の場合よりもやや大きめの値となっている。

3.5 実験Ⅱ: 継時波長弁別閾値, $\Delta\lambda$ -入閾値の測定

3.5.1 方法

実験Ⅰで継時的な波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ は 2 刺激の呈示開始時間遅れ SOA に対して、どの波長でも同様な時間特性を示し、特に SOA が約 200 msec 以上ではほとんど変化せず一定になることが示された。そこで実験Ⅱでは、SOA を 0 msec と 550 msec の 2 点に限りテスト波長を 430 から 650 nm まで 10 nm おきにとり波長弁別閾値が同時比較から継時比較になるとどのように変化するかをより詳しく測定し、継時比較における波長弁別能の劣化と総合的に把握することを目的とする。そこでここでは、多くのテスト波長数について測定する必要があるので、実験方法と精度は多少落ちるが、より短時間で測定できる改良型上下法に変更した。

[手続]

上下法は恒常法よりも短時間で閾値が求まる方法であるが、特に刺激の呈示順に被験者の判断が影響されやすいことが、一つの大きな欠点である。そこで本実験ではこの欠点を除くために、ランダムに刺激の呈示を利用する、改良型上下法を用い、波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ を測定した。

被験者は、実験Ⅰと同様にテスト刺激と比較刺激のクロマティックネスが、“同じ”か“違う”かと二択法により応答する。両刺激は明るさマッチングされたものを用いる。実験Ⅰとは異なり、ここではあるテスト波長 λ_t に対して長波長側の閾値 $\Delta\lambda_L$ と短波長側の閾値 $\Delta\lambda_S$ とをそれぞれ別のセッションで求めるようにした。テスト刺激に対する比較刺激の呈示方法は Fig. 3.12 に一例を示す。横軸は刺激の呈示順序、縦軸はテスト波長と比較波長の差を表わす。図中の +, - はそれぞれ被験者が、“違う”、“同じ”の応答をしたことを表わしている。横軸と境に上側の応答系列は $\Delta\lambda_L$ を求める系列、下側は $\Delta\lambda_S$ を求める系列である。比較刺激は両系列共に、被験者がはっきり“違う”の応答をする位置から始められ、被験者が“同じ”の応答を始めてあるま

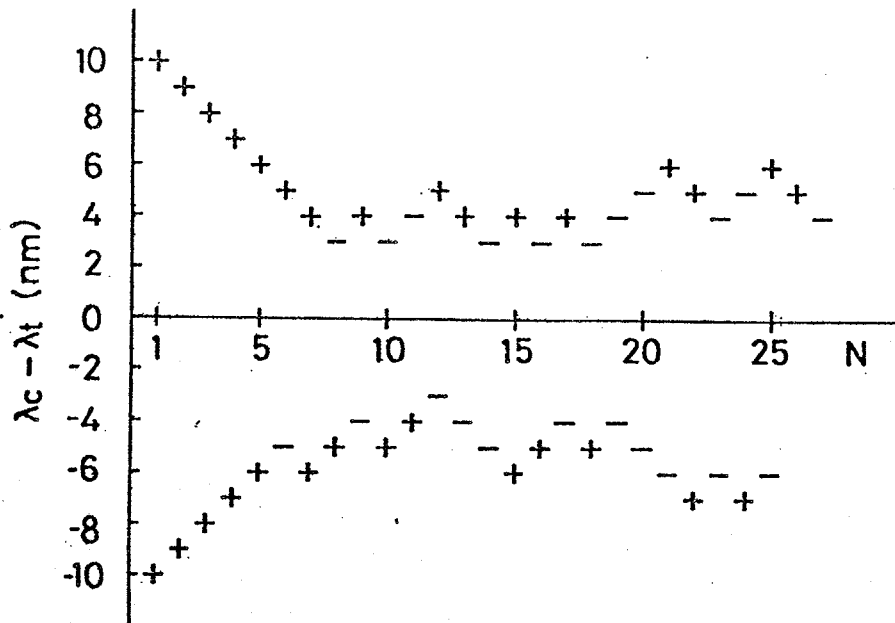


Fig. 3.12. テスト刺激に対する比較刺激の呈示方法の一例。横軸は刺激の呈示順序、縦軸は比較波長とテスト波長の差。+印が“違う”，-印が“同じ”応答を表わし、上側と下側の系列は異なるセッションで行なう。

で、1ステップずつテスト刺激に近づける。このステップの大きさは本セッション前にあらかじめ、前セッションを数回行ない、適当な値を求めておく。被験者が、最初に“同じ”応答をしてからは、図に示されるように応答が交差するまで1ステップずつ比較刺激とテスト刺激に近づけるか遠ざけるかを繰り返す。

1セッションは図の片側の系列に相当し、セッション内の1つのテスト波長に対して $\Delta\lambda_s$, $\Delta\lambda_l$ の順に連続したセッションで閾値を求めた。刺激の呈示回数は、応答が初めて交差した点から数えて、KU では 10~20回、HU.50 では 20回である。波長弁別閾数は、これらすべての応答に対する比較刺激の波長 λ_c を平均して λ_t との差をとり、 $\Delta\lambda_l$, $\Delta\lambda_s$ として決定した。被験者の眼の色覚応答をできるだけ回復するためにはセッション間には、少なくとも、2.3

分の明暗応答の時間を入れた。

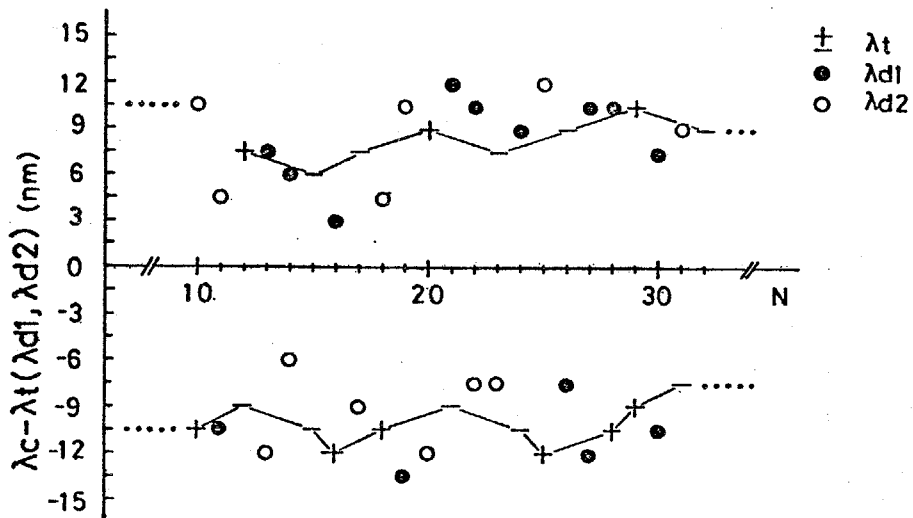


Fig. 3.13 ダミー刺激呈示の一例。ダミー波長 $\lambda_{d1}, \lambda_{d2}$ はそれぞれテスト波長 λ_t の長波長側と短波長側から選ばれる。横軸は刺激の呈示順序、縦軸は比較波長とテスト波長またはダミー波長 1, 2 の差を示す。黒丸, 白丸がそれぞれ $\lambda_{d1}, \lambda_{d2}$ の比較波長の呈示位置を表わしている。± は λ_t に対する応答である。

ダミー刺激は λ_t より長波長側と短波長側から λ_{d1} と λ_{d2} を選び、これらと λ_t を加えて、それぞれの系列の実験を行なった。呈示方法は刺激の順序効果が減少するように工夫した。Fig. 3.13 にダミー刺激呈示の具体的な一例を示す。+, - はテスト刺激, 黒丸が λ_{d1} , 白丸が λ_{d2} に対する応答である。縦軸はテスト波長, あるいはダミー波長とそれぞれの比較波長の差を, 表わしている。まず, テスト刺激が3回以上続けて呈示されないように, ダミー刺激を混ぜ, $\lambda_{d1}, \lambda_{d2}$ の選択はランダムにした。次にダミー刺激に対する比較刺激は上下法の呈示ではなく, ある波長範囲内からランダムに選んだ。

この範囲はテスト刺激に対する比較刺激の波長域の周辺とした。図の実線は、データとして採用したテスト刺激の応答と絡んだものであるが、前記したように、これらの応答が20個(ただしKUは10~20個)得られると1セッションの完了となる。

刺激の呈示時間Dは110 msec, 2分視野の間隔 θ は11'とした。実験の具体的な進め方は実験Iとほぼ同様であり、1セッションは約10分~15分で終了した。

実際の実験プログラムと付録Ⅱに載せる。

3.5.2 結果

Table 3.5に、3人の被験者の $\Delta\lambda_s$, $\Delta\lambda_l$ および $\Delta\lambda$ を示す。 $\Delta\lambda$ は後述する方法で計算したものである。Fig. 3.14に $\Delta\lambda_s$, $\Delta\lambda_l$ を図で表わす。横軸は λ , 縦軸は、波長弁別閾値を表わす。黒丸の実線が、SOA=0 msec, 白丸の破線がSOA=550 msecの結果であり、上側が $\Delta\lambda_l$, 下側が $\Delta\lambda_s$ を示している。1測定点は1回のセッションで求めたものであり、上下法による閾値決定時の呈示比較波長のばらつき標準偏差が縦棒で示されている。

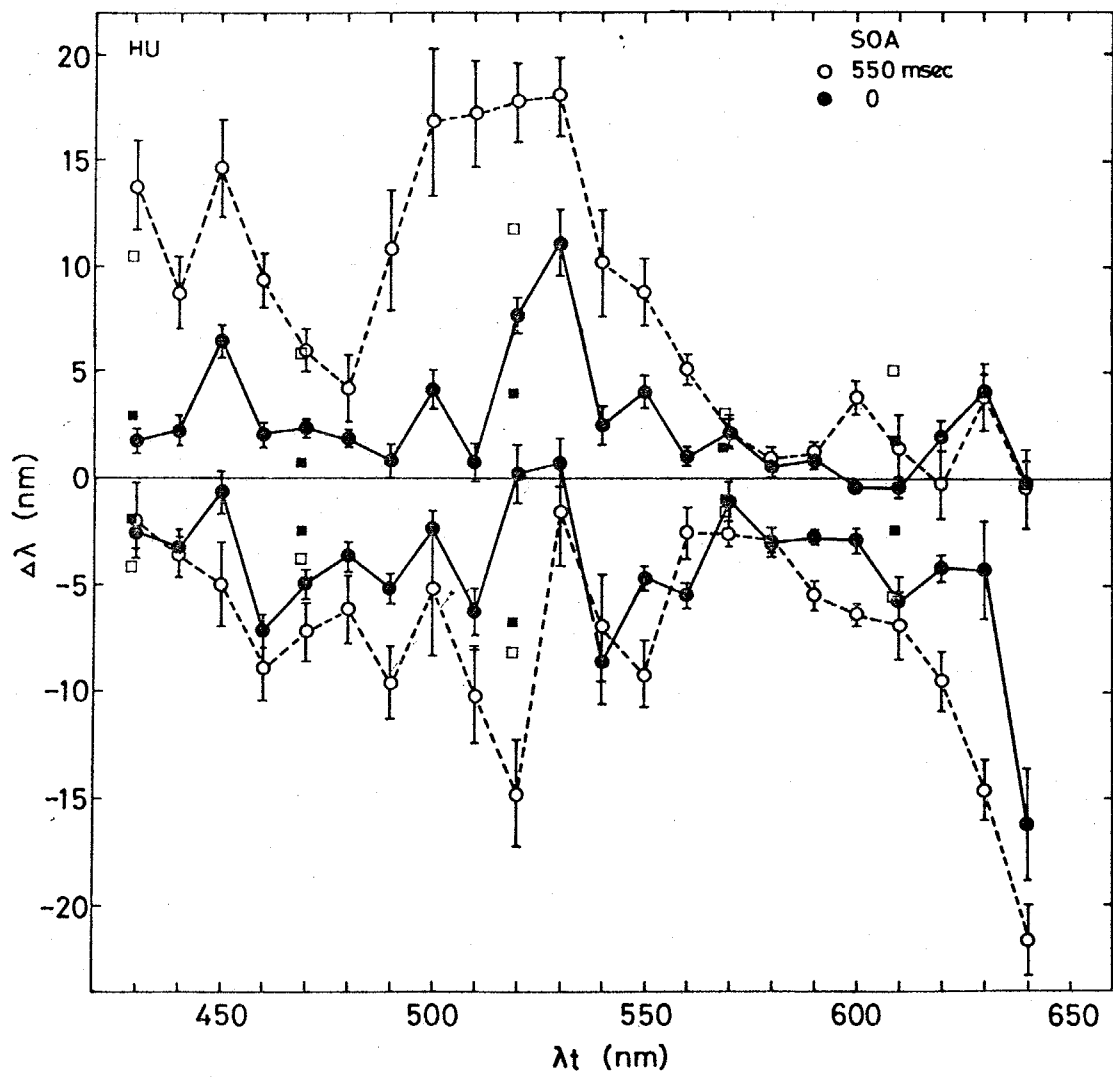
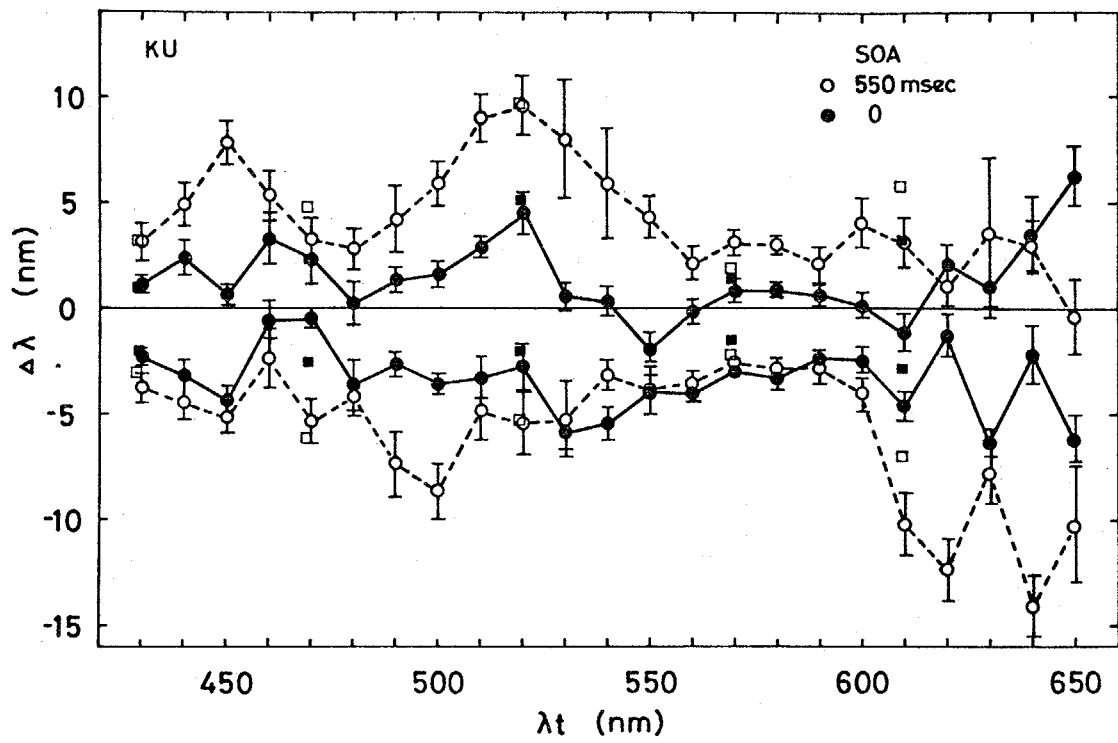
実験Iの結果と比較するため、実験Iで得た $\lambda_c = 430, 470, 520, 570, 610 \text{ nm}$, SOA=0, 550 msecの弁別閾値とそれぞれ黒四角, 白四角として図中に示した。両者の実験方法の違いを考慮すれば、KUでは610 nm以外ではよく一致しているといえるだろう。HUではKUほど両者は近い値となっていないが、520, 610 nm以外ではほぼ一致している。HUの520 nmでは $\Delta\lambda_l$, $\Delta\lambda_s$ 共に実験Iの結果よりも閾値が大きい値となっている。

まず、SOA=0 msecの時の $\Delta\lambda_l$, $\Delta\lambda_s$ は3人の被験者に共通して、510~540 nmの中波長域でピーク値をとり、SOの $\Delta\lambda_l$, HUの $\Delta\lambda_s$ を除くと590~610 nmおよび460~490 nmで極小値をとるといった類似の傾向が見られる。しかし510~540 nmの中波長域でのピーク値が $\Delta\lambda_l$ の方

Table 3.5 3被験者の波長弁別閾値 $\Delta\lambda_s, \Delta\lambda_e$ および $\Delta\lambda$ を示す。 $\Delta\lambda = (\Delta\lambda_e - \Delta\lambda_s) / 2$ 。 $D = 110 \text{ msec}$, $SOA = 0.550 \text{ msec}$ 。

λ_t (nm)	SOA (msec)					
	$\Delta\lambda_s$	0 $\Delta\lambda_i$	$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda_s$	550 $\Delta\lambda_i$	$\Delta\lambda$
KU:						
430	-2.250	1.138	1.694	-3.840	3.138	3.489
440	-3.188	2.393	2.791	-4.500	4.944	4.722
450	-4.409	0.567	2.488	-5.154	8.765	6.960
460	-0.583	3.290	1.937	-2.357	6.278	4.318
470	-0.500	2.250	1.375	-5.400	3.200	4.300
480	-3.667	-0.182	1.743	-4.200	2.829	3.515
490	-2.657	1.309	1.983	-7.400	4.179	5.790
500	-3.625	1.550	2.588	-8.679	5.885	7.282
510	-3.324	2.885	3.105	-4.909	9.000	6.955
520	-2.847	4.527	3.687	-5.464	9.593	7.529
530	-5.872	0.485	3.179	-5.250	8.029	6.640
540	-5.472	0.312	2.892	-3.167	5.944	4.556
550	-4.033	-1.980	1.027	-3.947	4.253	4.100
560	-4.139	-0.167	1.986	-3.640	2.050	2.845
570	-3.011	0.847	1.929	-2.577	3.118	2.848
580	-3.250	0.808	2.029	-2.880	2.960	2.920
590	-2.393	0.636	1.515	-2.854	2.053	2.454
600	-2.538	0.109	1.324	-4.077	4.000	4.039
610	-4.650	-1.150	1.750	-10.200	3.086	6.643
620	-1.313	2.147	1.730	-12.441	1.000	6.721
630	-6.411	0.995	3.703	-7.843	3.600	5.722
640	-2.231	3.500	2.866	-14.095	3.033	8.564
650	-6.215	6.300	6.258	-10.333	-0.429	4.952

λ_t (nm)	SOA (msec)					
	0		550			
	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda$	$\Delta\lambda_s$	$\Delta\lambda_l$	$\Delta\lambda$
HU:						
430	-2.600	1.650	2.125	-2.040	13.680	7.860
440	-3.300	2.150	2.725	-3.600	8.700	6.150
450	-0.720	6.400	3.560	-4.950	14.550	9.750
460	-7.200	2.000	4.600	-8.850	9.300	9.075
470	-5.000	2.300	3.650	-7.200	6.000	6.600
480	-3.700	1.800	2.750	-6.150	4.200	5.175
490	-5.200	0.800	3.000	-9.600	10.800	10.200
500	-2.400	4.150	3.275	-5.200	16.800	11.000
510	-6.370	0.700	3.535	-10.200	17.200	13.700
520	0.200	7.700	3.750	-14.800	17.800	16.300
530	0.700	11.100	5.200	-1.600	18.000	9.800
540	-8.720	2.480	5.600	-7.000	10.200	8.600
550	-4.700	4.100	4.400	-9.300	8.700	9.000
560	-5.500	0.950	3.225	-2.600	5.100	3.850
570	-1.120	2.120	1.620	-2.640	2.220	2.430
580	-3.040	0.560	1.800	-2.750	0.900	1.825
590	-2.840	0.880	1.860	-5.500	1.150	3.325
600	-2.880	-0.440	1.220	-6.370	3.780	5.075
610	-5.840	-0.400	2.720	-6.900	1.350	4.125
620	-4.200	2.040	3.120	-9.450	-0.300	4.575
630	-4.320	4.080	4.200	-14.550	3.750	9.150
640	-16.200	-0.200	8.000	-21.600	-0.540	10.530
SO:						
430	-3.850	2.250	3.050	-2.900	4.700	3.800
440	-3.220	1.330	2.275	0.360	13.680	6.660
450	-3.040	2.720	2.880	-2.800	12.400	7.600
460	-1.400	1.400	1.400	1.950	9.000	5.475
470	-4.480	2.280	3.380	-5.100	4.200	4.650
480	-3.850	1.650	2.750	-3.400	3.500	3.450
490	-4.000	1.250	2.625	-6.400	2.600	4.500
500	-3.570	3.150	3.360	-6.900	13.050	9.975
510	-4.320	5.360	4.840	-6.750	8.250	7.500
520	-6.300	1.300	3.800	-7.950	4.650	6.300
530	-6.560	-0.160	3.200	-1.950	10.800	6.375
540	-8.900	-1.450	3.725	-4.700	8.200	6.450
550	-3.650	-0.550	1.550	-3.800	4.600	4.200
560	-4.000	-0.550	1.725	-0.880	6.000	3.440
570	-1.450	2.400	1.925	-1.400	3.640	2.520
580	-1.080	1.360	1.220	-3.100	2.750	2.925
590	0.500	1.800	0.650	-5.500	-0.900	2.300
600	-2.280	0.640	1.460	-8.600	-3.000	2.800
610	-3.350	1.700	2.525	-12.000	0.900	6.450
620	-5.120	1.040	3.080	-12.600	-3.600	4.500
630	-3.900	5.300	4.600	-16.500	-2.400	7.050
640	-4.720	0.000	2.360	-6.970	-2.040	2.465
650	-5.300	0.200	2.750	-13.400	-4.300	4.550



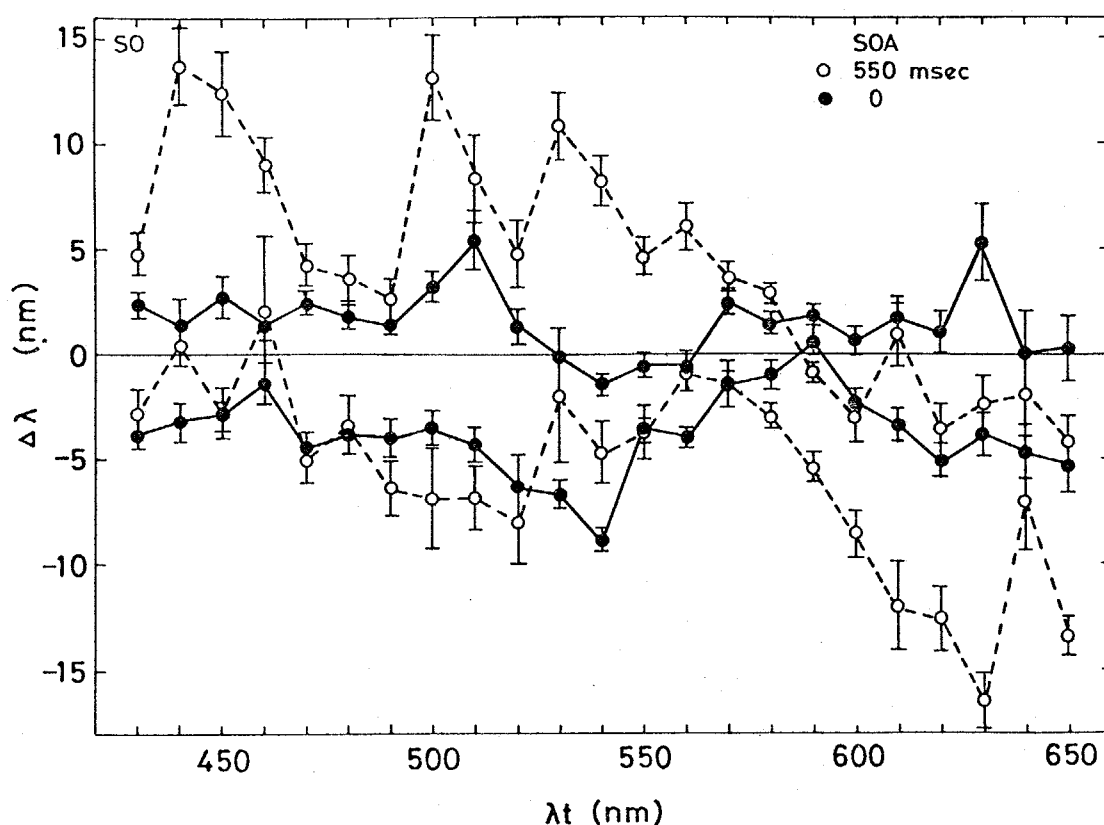


Fig. 3.14 3被験者の波長弁別閾値, $\Delta\lambda_L$, $\Delta\lambda_S$ 。 $D=110\text{msec}$ 。 $SOA=0$ (—●—), 550 (---○---) msec に対して, 上側が $\Delta\lambda_L$, 下側が $\Delta\lambda_S$ を示している。
 ■, □ はそれぞれ, 実験 I, シリーズ (1) $SOA=0$, 550 msec に対する結果。

が $\Delta\lambda_S$ よりも多少短波長側によっているなど $\Delta\lambda_L$ と $\Delta\lambda_S$ の形が一致しない点も多く、Bedford and Wyszecki (1958) の結果に反している。 $SOA=550\text{ msec}$ の場合は $\Delta\lambda_L$, $\Delta\lambda_S$ の振幅は $SOA=0\text{ msec}$ の場合と比べて増大しているが、長波長域での $\Delta\lambda_L$, 短波長域での $\Delta\lambda_S$ を除いて $SOA=0\text{ msec}$ の場合と形の変化はほぼ同様である。長波長域での $\Delta\lambda_L$ の値と、短波長域での $\Delta\lambda_S$ は $SOA=0\text{ msec}$ の場合よりも等しいか小さくなっている。

あるテスト波長に対して、長波長側の閾値と、短波長側の閾値は色の見えの変化が方向により異なれば、一致する必要はなく、むしろ両者を別々に扱った

方が、波長弁別閾値を表わすデータとしてはより正確であるといえよう。両眼色差の許容限界を実験した中嶋と池田(1980), Ikeda and Nakashima (1979)はこのことの必要性を強調している。しかし、本実験では、特に、 $SOA=0\text{msec}$ の場合などは $\Delta\lambda_L$ が大きい波長では $\Delta\lambda_S$ は小さくまたその逆というように $\Delta\lambda_L$ と $\Delta\lambda_S$ の凹凸がよく一致しており、単純に被験者の見えの中心(P.S.E., point of subjective equality)がシフトした結果、生じたと考えられる点も多い。したがってここでは $\Delta\lambda_L$ と $\Delta\lambda_S$ の違いには立入らず、次に述べるように両者を平均した値を弁別閾値として用いることにする。

波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ は実験Iと同様に

$$\Delta\lambda = (\Delta\lambda_L + \Delta\lambda_S) / 2$$

で定義する。各被験者の結果を Fig. 3.15 に示す。Fig. 3.16 には平均値と他の実験結果と共に示してある。両図とも、縦軸が $\Delta\lambda$ を表わし、横軸は λ 、黒丸実線が $SOA=0\text{msec}$ 、白丸破線が $SOA=550\text{msec}$ の結果を表わす。 $SOA=0\text{msec}$ の場合の波長弁別閾値は3人の被験者共に、 $440\sim 460\text{nm}$ の短波長域、 $510\sim 540\text{nm}$ の中波長域で二つの極大値、および $460\sim 480\text{nm}$ の短波長域、 $590\sim 600\text{nm}$ の長波長域で二つの極小値をもっており、3人の平均値は Fig. 3.16 に示すように、過去の実験(Wright and Pitt, 1934; Bedford and Wyszecki, 1958; Siegel, 1964)と比較すると、ほぼ一致していることが認められる。 $SOA=550\text{msec}$ の場合には $SOA=0\text{msec}$ と比べると $\Delta\lambda$ の値は全波長域を通して、縦方向に増幅した形となっている。しかし、中波長域でのピーク値が、やや短波長側にあり、また 450 および 500nm 付近での増加が、他の領域に比べて大きく表われている。ただし、 $SOA=550\text{msec}$ でHVの 520nm の値は 16nm とかなり大きな値となっているが、前述したように、実験Iの結果との差が大きく、値そのものには疑問が残るが、ピークはやはりこの波長周辺にあると結論できる。

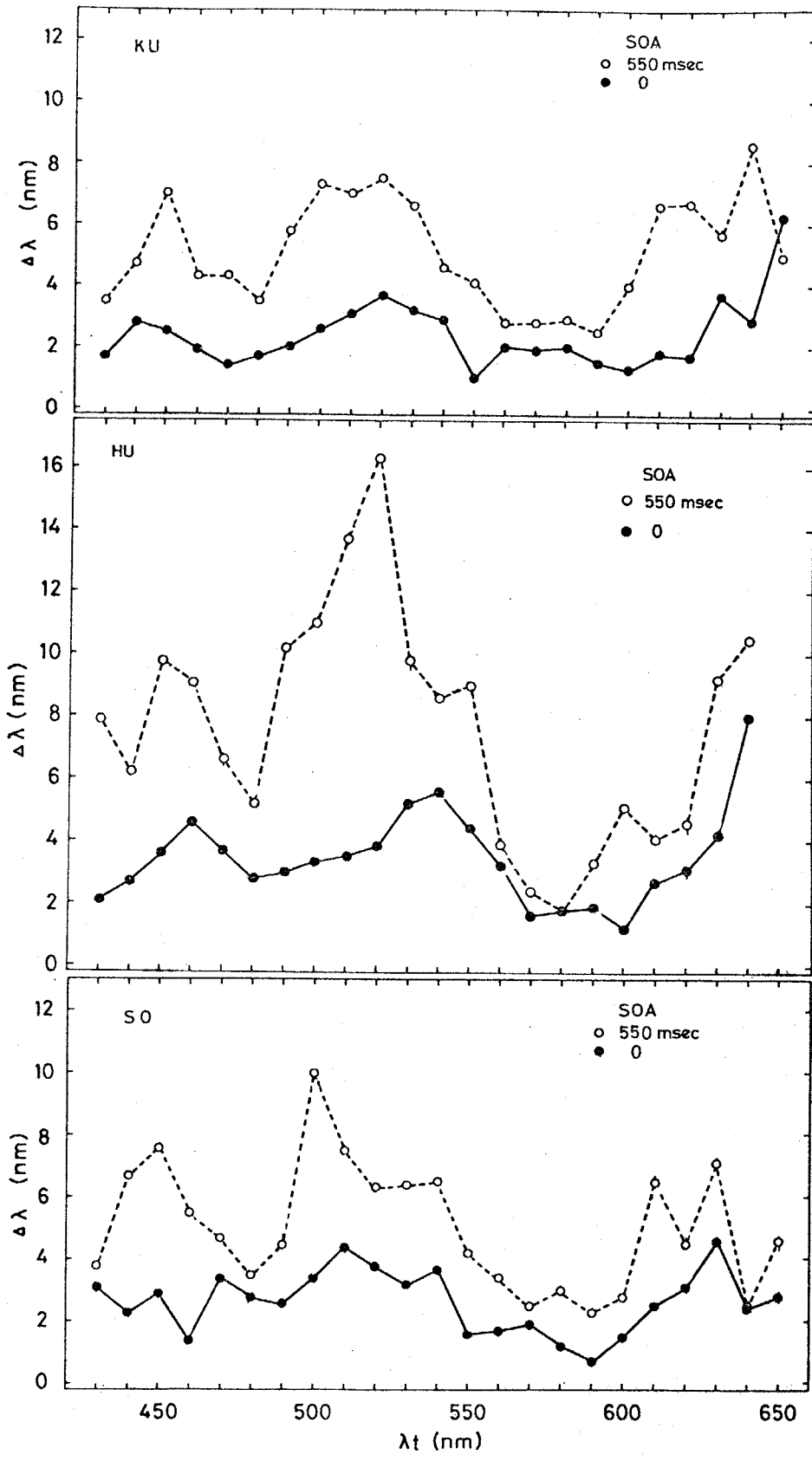


Fig. 3.15 3被験者の波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ 。D=110msec, SOA=0.550 msec。

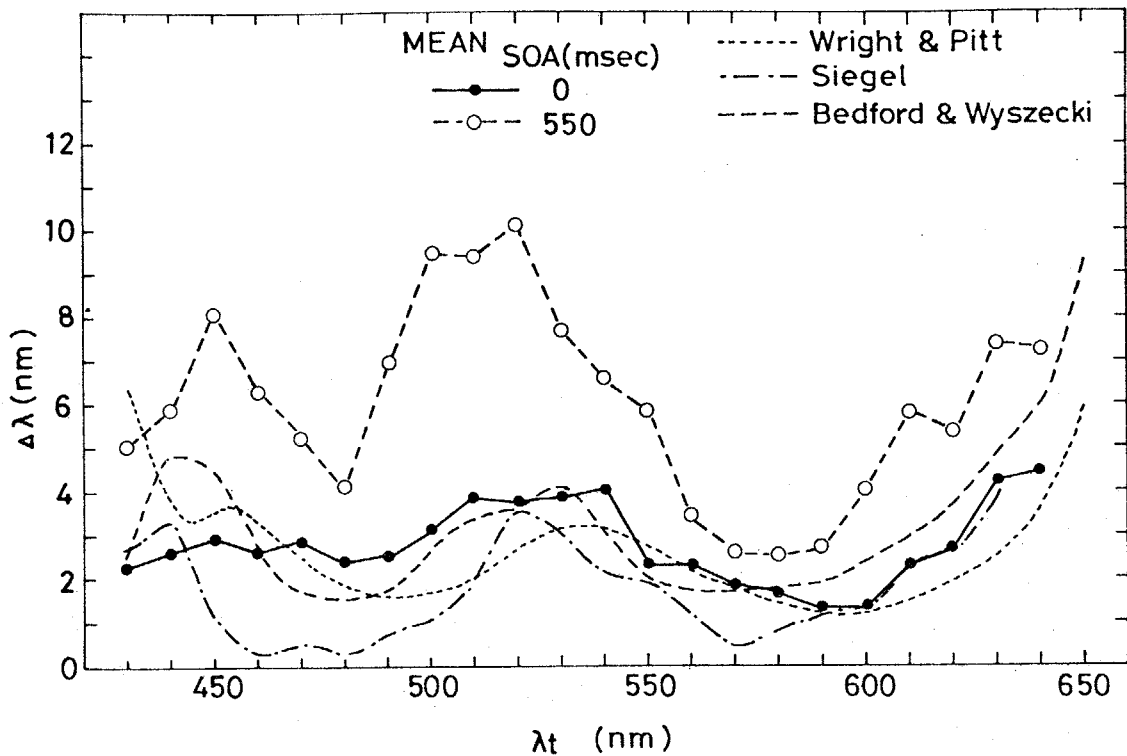


Fig. 3.16 3被験者の波長弁別閾値の平均値と過去の実験結果と共に示す。
 $D=110$ msec, $SOA=0, 550$ msec。過去のデータは、Wright and Pitt
 (1934), Siegel (1964), Bedford and Wyszecki (1958)。

3.6 実験総括

3.1節で述べたように本研究では、まず実験Ⅰで波長弁別閾値の時間的特性、 $\Delta\lambda-T$ 関数と、次に実験Ⅱで波長特性、 $\Delta\lambda-\lambda$ 関数と、詳細に測定した。そこで本節では、これらの別々に測定した実験結果をまとめて表わすことにある。Fig. 3.17に実験Ⅰの結果である Fig. 3.9 と、実験Ⅱの結果である Fig. 3.16 の平均値を合わせて示す。横軸が、テスト波長 λ_t 、縦軸が波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ 、奥行き軸がSOAを示している。図は、実験Ⅱで求めた波長弁別

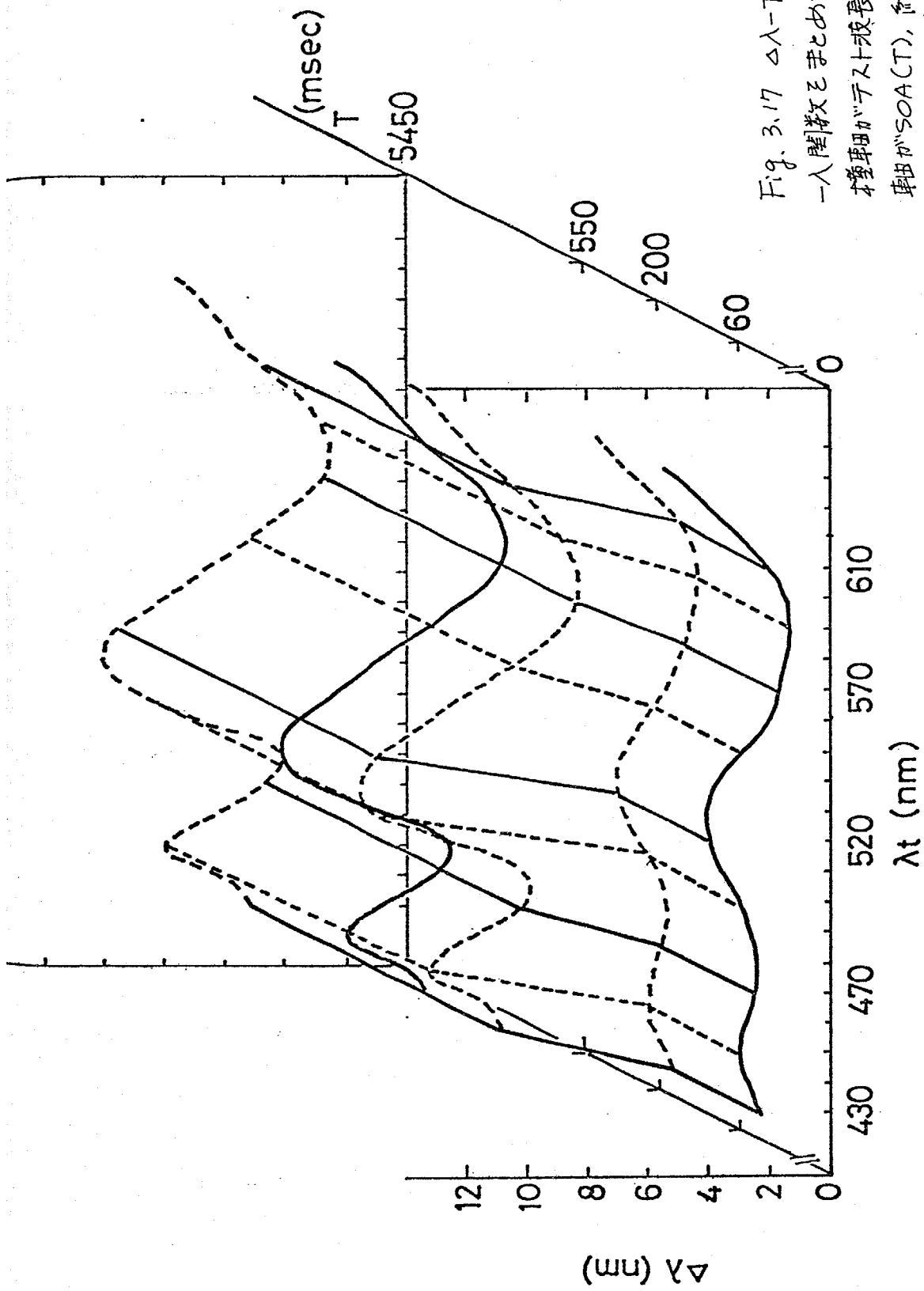


Fig. 3.17 $\Delta\lambda$ - T 関係, $\Delta\lambda$ 一人閉路をまとめて表わす。
 本機がテスト液を入り、実行き
 車軸がSOA(T), 自従車軸が波長
 弁別関係 $\Delta\lambda$ 。実線が実験値,
 工の測定結果。破線はどの間に
 補間した結果である。

関数をもとにして、実験Iで求めた時間特性を用いてその間を補間したもので、図中の実線が実験I, IIで測定した部分を表わし、破線は、補間した結果である。図には実験I, IIの結果の関係がより一層明確に示され、波長弁別関数の時間的変化と容易に知ることができる。

Fig. 3.17 はパラメータとして呈示時間は110msec、視野は 2° の2分視野で中心固視、明るさレベルは76tdといったようにある一定の実験条件のもので、測定した結果である。特に、呈示時間の110msecという値は、過去の研究に比べると、多少小さい値となっており、確かにFig. 3.11で示したように刺激の呈示時間を増加していくと470, 520nmでは $\Delta\lambda$ の値がSOAに対して一様に減少した。ところがFig. 3.16で表わされているように本実験の $D=110$ msecの波長弁別関数の形は、連続呈示の場合(Wright and Pitt, 1934; Bedford and Wyszecki, 1958)あるいは $D=200$ msecの場合(Siegel, 1962(b), 1964)と本質的な違いはないため、 $D=110$ msecという呈示時間でも波長弁別に関しては充分の長さをもっていると考えてもよいであろう。その他のパラメータを変えた場合、Fig. 1.3~1.5で示したように、同時比較の波長弁別関数が変化することは明らかであり、それに伴い継時比較の波長弁別関数も、形、大きさが変化を受けるとであろう。しかし、本実験で用いた、視野の大きさ、位置、明るさ等のパラメータは、波長弁別閾値を求めるといった研究では、いわば標準的なものである。したがって、本実験結果は、以後の継時比較における波長弁別の研究に対して一つの基準と与えるものといえるであろう。

本実験で明らかとなったことは、以下に示すとおりである。

- (1) 波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ は2刺激の呈示開始時間遅れSOAが0msecから60msecまでは一定であり、同時呈示の場合の波長弁別閾値 $\Delta\lambda_0$ と等しい値をもつ。これは、刺激呈示時間 D を55msecから220msecまで変化させても変わらない特性である。

(2) SOAが60 msec以上では $\Delta\lambda$ は次第に増加し、SOAが約200 msecから400 msecの範囲以上では、再び一定値 $\Delta\lambda_c$ をとるようになる。 $\Delta\lambda_c$ の値は、波長により異なる。

(3) SOA=0 msecの同時波長并列関数とSOA=550 msecの継時波長并列関数を比較すると、後者は前者よりどの波長でもほぼ一様に増大する。ただし $\Delta\lambda$ 値は、450 nm, 500 nm付近でやや大きく、570 nm付近でやや小さく増大する傾向も示した。

第4章 明るさの継時弁別

本研究では視覚情報の「色」のうち、クロマティックネスだけを取り扱った。しかし、明るさも色の重要な一属性であり、継時比較において、波長弁別能と同様に明るさの弁別能が劣化していくかどうかは興味ある問題であり、両者の時間特性と比較することで、視覚系内でクロマティックネスの情報と明るさの情報と明るさの情報が同等に扱われているかどうかを調べることが出来る。また実際の場面では2色と比較する時には、2色の明るさも異なっている場合が普通であるから明るさの継時弁別を調べることは、応用的な意味からも重要であると考えられる。本論文の主目的は、波長の継時弁別であるが、本章では補足実験として、等クロマティックネスの2刺激の呈示間に時間遅れを入れ、明るさの弁別の継時的変化を測定することにした。

4.1. 実験概要と方法

4.1.1 装置

この実験では、2刺激の明るさの弁別を測定するため、2刺激のクロマティックネスは等しくしておく必要がある。単波長光は、ユニーク色 (unique color) 以外では明るさの増減で色相がシフトする現象、すなわち、Bezold-Brücke hue shift が起こることが知られている。(Boynton and Gordon, 1965)。そこで、2刺激には白色と、ユニーク藍色に近い 570 nm の単色光を用いた。白色はモノクロメータの 0 次回折光を利用し、フィルターホルダー F1, F2, F4 に色温度変換フィルターを入れることで作成した。結果として、左右の視野にほぼ等しい白色が得られた。視野は、実験 I, II と同様、片側 1° の二分視野で左右の視野間の間隔は $41'$ とした。

4.1.2 手続

Fig. 4.1 に示すように、右側の視野に輝度 L_t のテスト刺激、左側の視野に輝度 L_c の比較刺激を呈示する。刺激が白色の場合には、テスト刺激の明るさを実験 I, II と等しくするため主実験に先立ち、明るさのマッチングを直接比較法により行った。まず、右の視野に $570 \mu\text{m}$, 76td の刺激を呈示し、これに左の白色刺

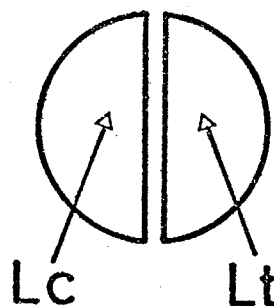


Fig. 4.1 明るさ弁別のための視野。右の視野に、輝度 L_t のテスト刺激、左の視野に、輝度 L_c の比較刺激が呈示される。

激の明るさとマッチングする。次に右の視野を白色刺激にもとし、その明るさをもとめて左の白色刺激の明るさにマッチングする。このようにして決めた明るさをもつ右側の白色刺激をテスト刺激とした。マッチングはそれぞれ 20 回、調整法で行ない、呈示時間 Δ は 110msec とした。刺激が $570 \mu\text{m}$ の場合はテスト刺激としては明るさの基準となっている $570 \mu\text{m}$, 76td の刺激を使用した。

次に述べる手続は、実験 I とほとんど等しいものである。被験者は、呈示された 2 刺激の明るさと比較して、両者が“同じ”か“違う”かを判断し、どちらか一方を二択法により応答する。これは実験 I, II と等しい判断基準であり、本実験と実験 I, II の結果が直接できるように考慮した。 L_c としてはテスト刺激と同じ明るさに見える輝度の周辺から 9 個の刺激を選んだ。その範囲は主実験前に、1, 2 セッションの実験を行ない、被験者の応答がほぼその範囲内で変化するようにして求めた。ここでも、テスト刺激の明るさに対する学習効果の影響を除くためにダミー刺激を用意し、テスト刺激にランダムに混ぜて呈示した。ダミー刺激の輝度はやはりテスト刺激に対する L_c の範囲内か

ら4個選んだ。

$D=110$ msec とし、SOAは0, 30, 70, 110, 200, 500, 1000, 2000, 5000 msecの中から、6, 7個選んだ。1セッションの構成は実験Iと等しい。1つのSOAに対する明るさの弁別閾値は4~5セッションの合計、呈示回数にして20~25回の応答から求めた。

4.1.3 被験者

被験者は 実験I, II と共通の KU, HU を用いた。

4.2 結果と考察

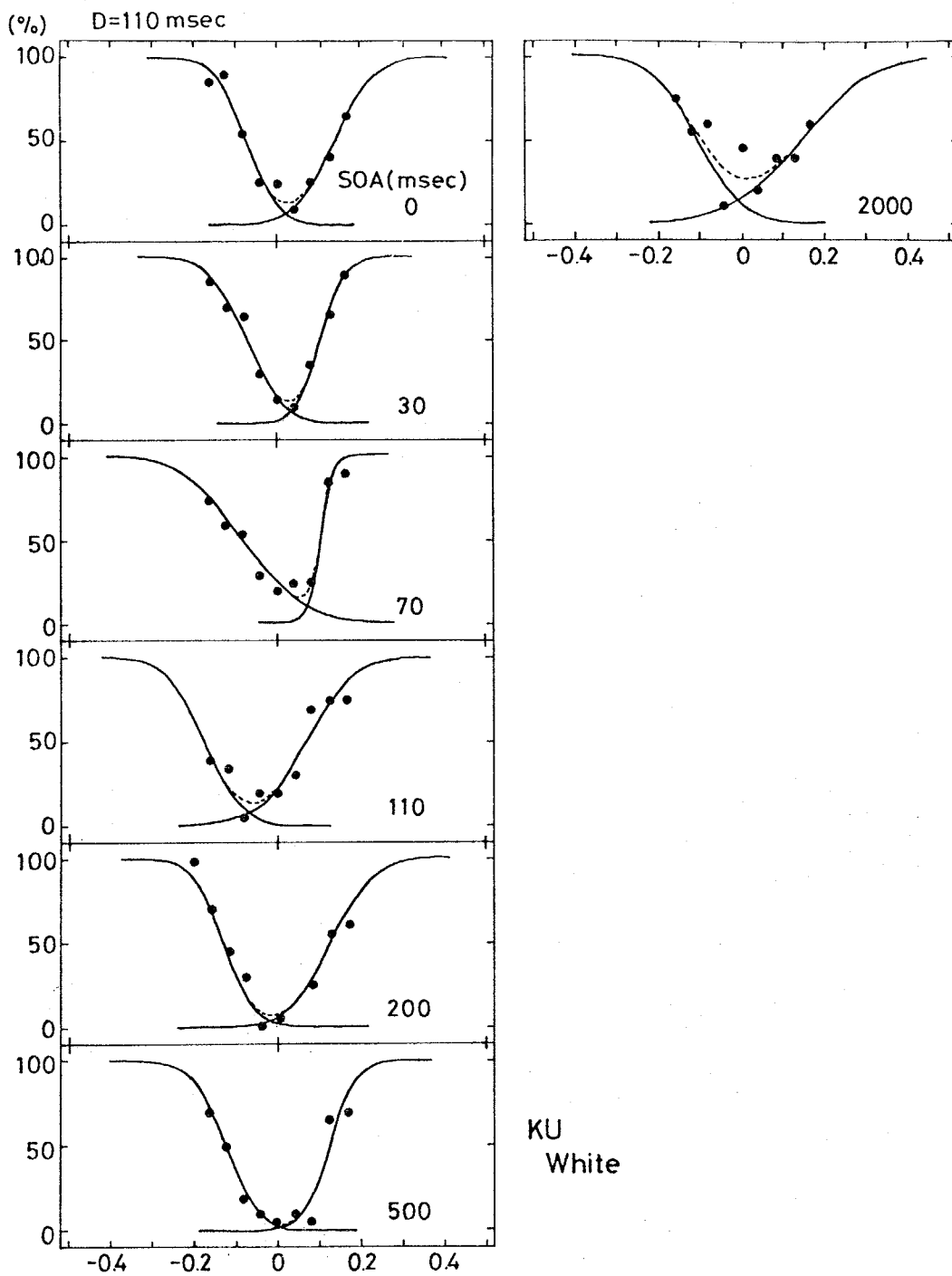
すべての応答結果を Fig. 4.2 (a)~(c) に示す。横軸は比較刺激の輝度の対数に比例する軸で、0点は任意の位置にある。ただし、テスト刺激が等しい同一の被験者内での、0点の位置は一致させてあり、比較刺激の強度が減つていく（ウェッジ濃度が増加する）方向を正方向としてある。縦軸は、被験者が“違う”と答えた割合を示す。図中、黒丸が測定点であり、2本の実線は実験Iと同様な方法で和が測定点に最適に合うようにして、求められた累積正規分布曲線である。

明るさの弁別閾値 ΔL は2本の分布曲線から50%の差閾値として決める。右側、左側の分布曲線の縦軸50%と与える輝度を、それぞれ L_1 , L_2 とおくと

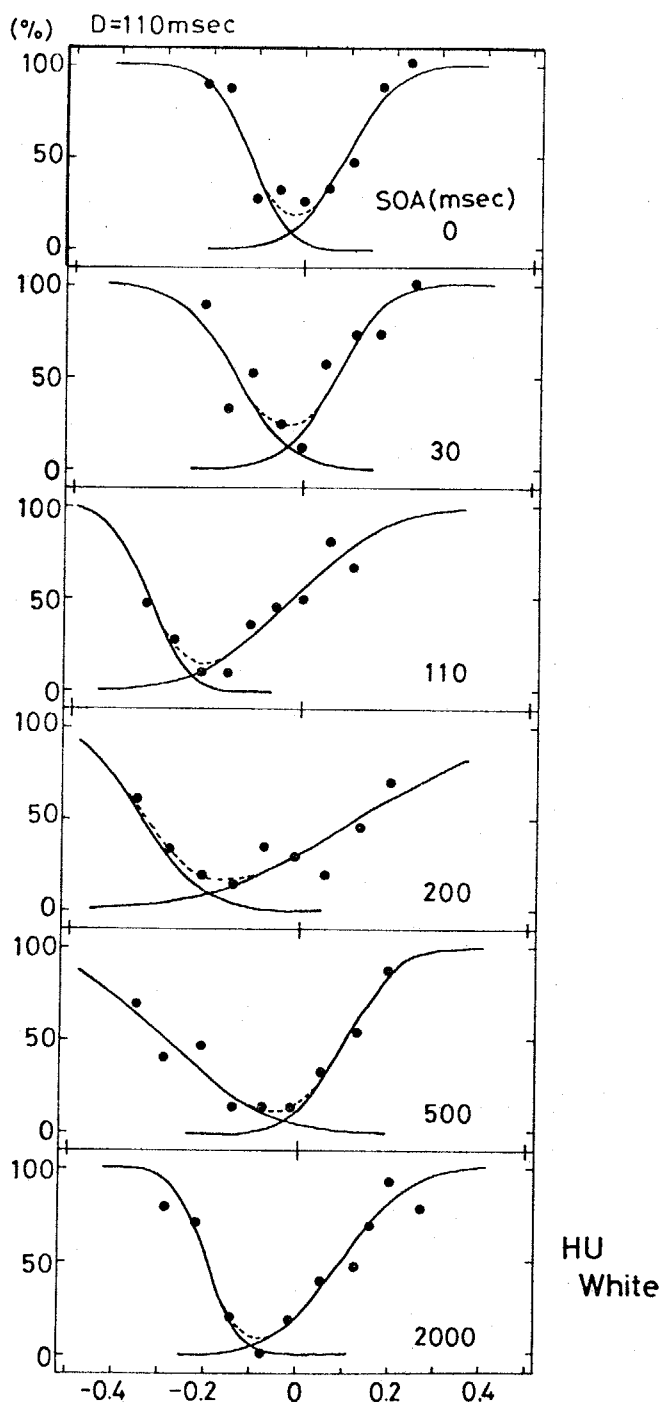
$$\Delta L = (L_2 - L_1) / 2$$

とある。Fig. 4.2 の2曲線の交点はテスト刺激と明るさが等しく見える比較刺激の位置と与えると考えられる。ここでは、その交点の比較刺激の輝度を L_0 とし、ウェーバー比 (Weber fraction) $\Delta L / L_0$ で弁別閾値を表わ

(a)



(b)



(c)

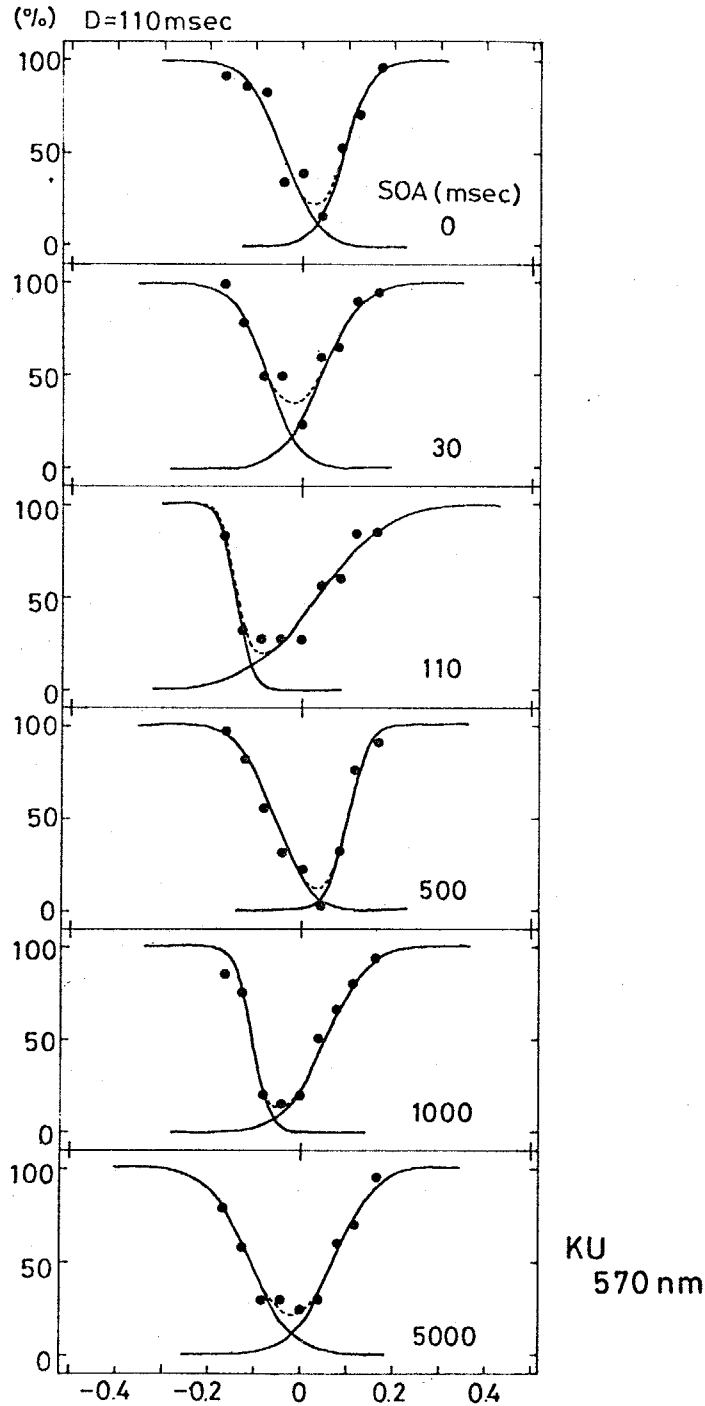


Fig. 4.2 2被験者の応答結果。横軸は比較刺激の相対輝度の対数、縦軸は“違う”応答を示す。黒丸が測定点、2本の実線と破線は最適応答確率曲線と表わす。

ることにある。L₀の位置はSOAの値によって多少変化しているが、各SOAの条件毎にL₀の値を求めて用いた。ΔL/L₀とSOAの関係を示したのがFig. 4.3である。横軸はlog SOA, 縦軸はlog ΔL/L₀を示している。

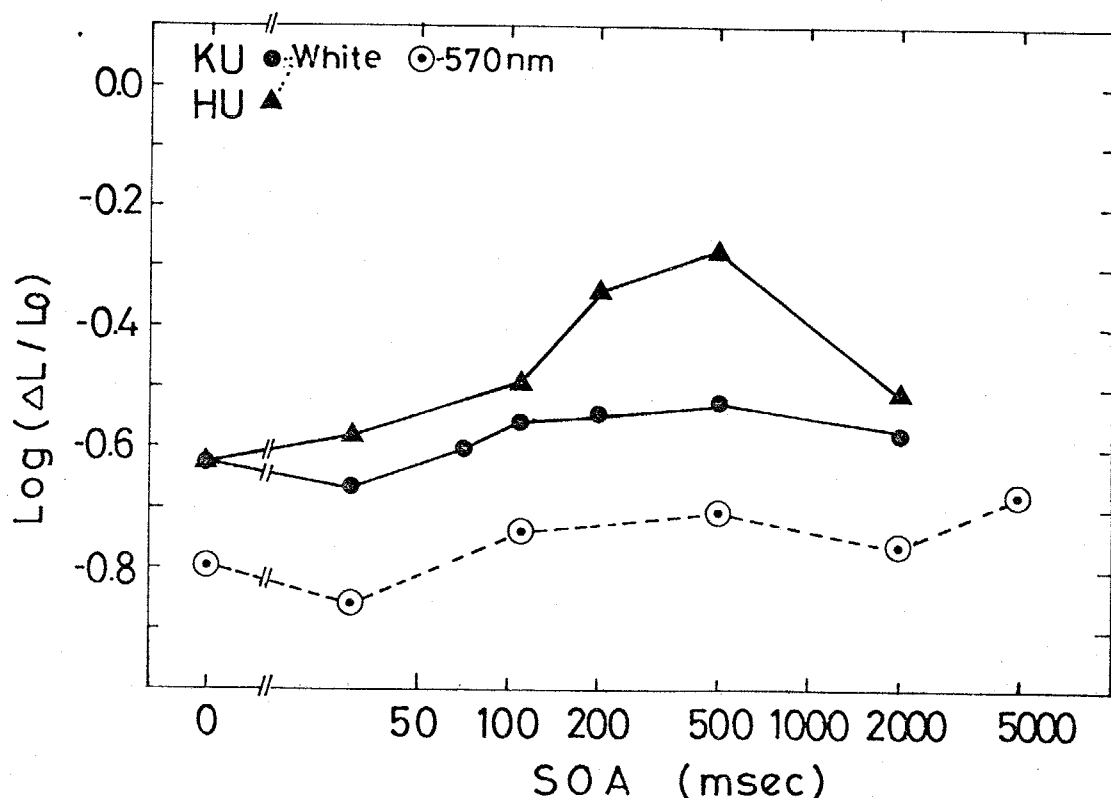


Fig. 4.3 明るさ弁別閾値ΔL/L₀のSOAに対する変化。L₀はFig. 4.2の応答確率曲線の交点の輝度, ΔLは50%閾値を用いた。2被験者, 白色, 及び570nm。

SOA=0msecでのウェーバー比がKUの570nmで0.16, 白色で0.24, HUの白色で0.24と photopicの明るさレベルでの通常の値の約0.01と比較するとかなり大きな値となっている (Wysocki and Stiles, 1967)。この差の原因には、110msecといた短時間呈示、左右の視野間の41'とい

う間隔算が可能性として考えられる。

図をみると KUでは 570 nm, 白色ともに $\Delta L/L_0$ は SOA が 0 から 30 msec までほぼ一定, その後 200 ないし 500 msec までに増大し, その後は再び一定となっている。HUでも, ほぼ同様の傾向を示している。

継時比較による明るさ弁別閾の変化は 2人の被験者共に, 実験 I の波長弁別閾の場合の特性とよく一致している。これより明るさの弁別能も継時比較によって劣化すること, またその劣化の時間特性はクロマティックネスの弁別の場合と等しいことが示された。この結果は明るさの情報も, クロマティックネスの情報と同様に記憶内で失われていくものである。あなわち, 両者を含んだ“色”としての情報が記憶の中で消失していくと考えると理解できる。

第5章 総合的考察

ここでは以上述べた実験に関して、それらの結果のもつ意味について、視覚のメカニズム及び応用面からの考察を行なう。

5.1 実験Iの考察

[$\Delta\lambda$ -T 関数]

Fig. 3.9より波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ はSOAの増加により、増大することが明らかとなった。波長の違いにかかわらず $\Delta\lambda$ はSOAが約60msecまでは変化なく、SOAが0msecの場合と等しい値をとり、その後SOAが約190msecまでに増大し、SOAがそれ以上では再び一定になるという時間特性を示した。この時間特性は、本実験が初めて明らかにした点の一つである。

この結果は 継時比較 あるいは 記憶比較 による視覚系の波長弁別能は明らかに同時比較に比べて劣化することを示し、この点、前述した Burnham and Clark (1955), Newhall et al. (1957) らの色弁別能の継時比較による劣化と一致するものである。また、波長弁別能の劣化は約60msecから190msecという極めて短い遅延時間の範囲内で起り、そこには視覚系の色に関する短期記憶の働きが反映していると考えられる。この色の短期記憶については節を改め5.3節で詳しく述べることにする。

Fig. 3.9をみると $\Delta\lambda$ 値の大きさは波長により異なっており、違いは $\Delta\lambda$ 値が全てのSOAの点で上下方向にシフトしたような形となっており表われている。そこで、ここでは $\Delta\lambda$ 値の大きさの変化を表わく一方法として $\Delta\lambda$ と $\Delta\lambda_0$ との比をとって考える。 $\Delta\lambda_0$ としてはTable 3.3に示されている値を用い、比 $V = \Delta\lambda / \Delta\lambda_0$ を各波長別に計算し、プロットするとFig. 5.1になる。図中の実線はTable 3.3にある $T_0, T_c, \Delta\lambda_c / \Delta\lambda_0$ の値を用い

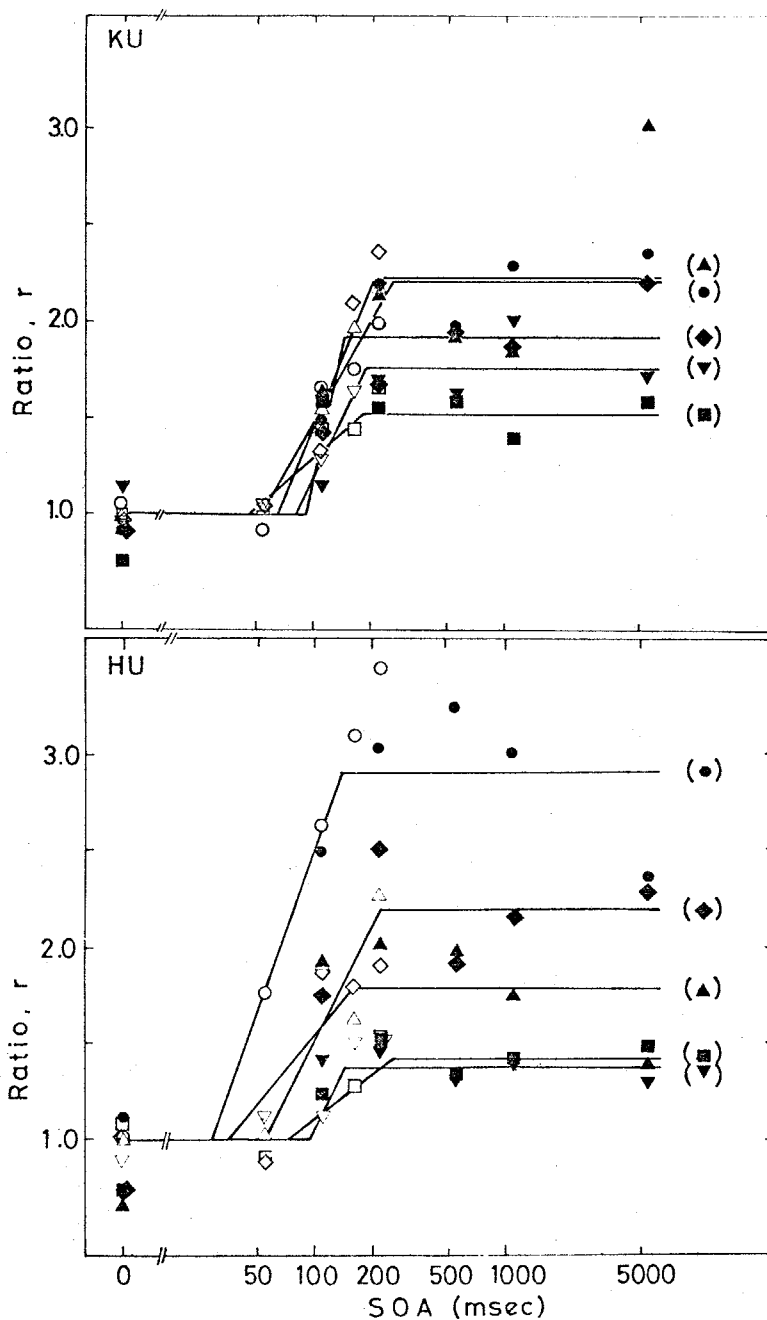


Fig.5.1 r ($\Delta\lambda/\lambda_0$)のSOAに対する変化。D=110msec。被験者別に示す。▲,△: 430nm, ●,○: 470nm, ■,□: 520nm, ▼,▽: 570nm, ◆,◇: 610nm。黒シンボル, 白シンボルはそれぞれシリーズ(1),(2)の結果。実線はTable 3.3に示した T_0 , T_c と $\Delta\lambda_c/\lambda_0$ を用いて引いた直線である。

て引いた直線である。図をみると KU, HU とともに弁別能の劣化は 470nm で大きく、 $520, 570\text{nm}$ では小さい傾向にある。比 r の波長による違いは HU の方が KU よりも大きい変化幅をもっている。 $\Delta\lambda_c/\Delta\lambda_0$ の値を λ_0 の波長で平均すると Table 3.3 にも示されているように、両被験者共に 1.9 となる。したがって、継時比較による波長弁別閾値は波長による違いはあるが、平均すると約 2 倍に増大あることが認められる。

Fig. 5.2 に以上で述べた波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ の SOA に対する $\Delta\lambda-T$ 関数と比 r を用いてまとめて表わす。縦軸、横軸は Fig. 5.1 と同様であるが、 r の平均と被験者別にプロットしてある。図中の縦棒は標準偏差である。

さてここで、波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ と $\Delta\lambda_0$ の比 r を色差という点で改めて考えてみよう。 $\Delta\lambda_0$ は、同時呈示の場合の波長弁別閾値であり、これが波長により異なることは、1/節で述べたように、周知の事実である (Wright and Pitt, 1934)。これは、全波長域をとると色の変化が波長の変化と線形に対応しておらず、ある波長の領域では色は急激に変化し、また他の波長領域では色はほとんど変化しないことを示している。 $\Delta\lambda_0$ 値の小さい波長では、色の変化は大きいし、 $\Delta\lambda_0$ の値の大きい波長では、色の変化は小さいということになる。言い換えると $\Delta\lambda_0$ の値はその波長で色の差がわかるか、わからないかの限界の値、あなわち単位の色差 (color difference) を与える量であると考えられる。したがって、ここで考えた比 r は $\Delta\lambda$ 値と色差に変換した量であるといえよう。

ここで、以下に述べるような色差のモデルを使って、各波長別に求めた比 r の意味を考えてみる。Fig. 5.3 にこの説明図を示す。(I) 図に色の違いがわかるためには必要な色差と SOA の関係を示す。(II) 図はある波長 λ での $\Delta\lambda$ 値が与える色差の大きさを示す図で、 $\Delta\lambda$ の微小範囲では、色差の変化は線形であると仮定する。 λ_1, λ_2 で示すように各波長によって $\Delta\lambda$ に対する色差の変化量は異なっている。(III) 図は (I) 図での色差の変化と (II) 図を用いて $\Delta\lambda$ の値に変換したもので、本実験では (IV) 図に示す $\Delta\lambda$ 値の変化と求めてい

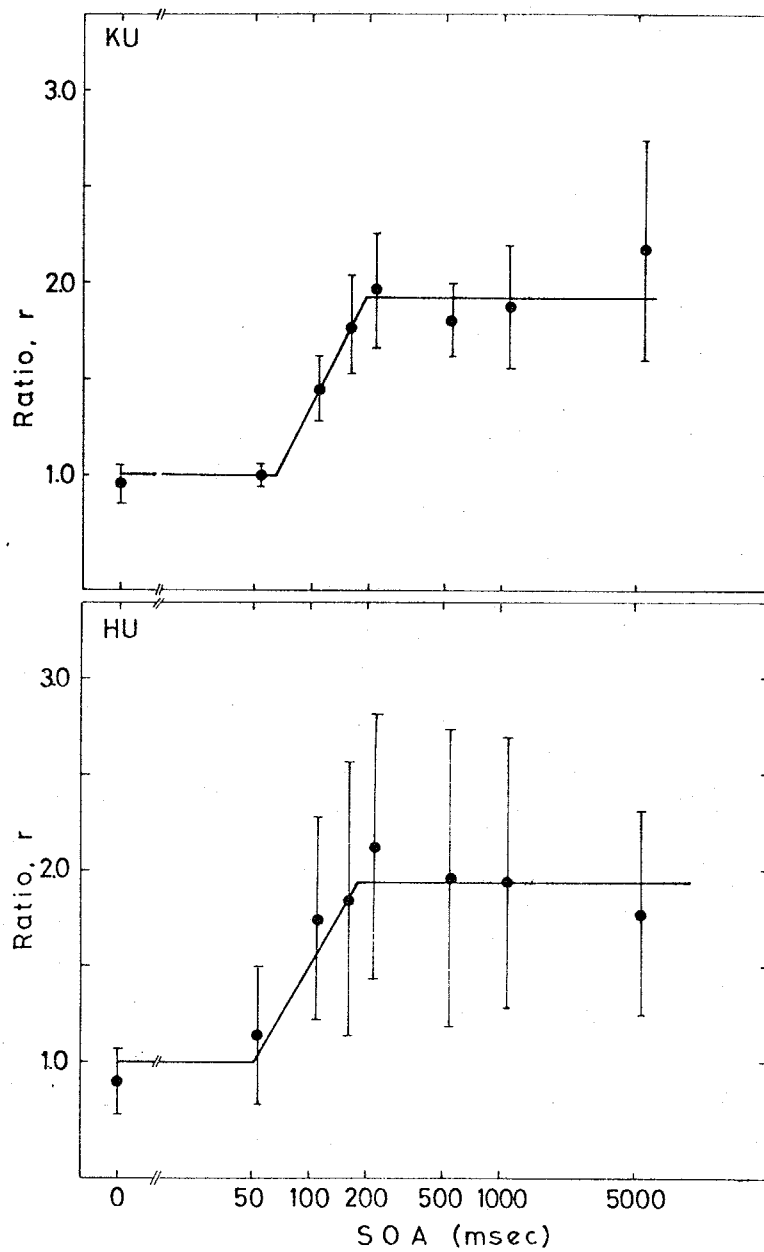


Fig. 5.2 比 r ($\Delta\lambda/\Delta\lambda_0$) の平均値の SOA に対する変化。 $D=110\text{msec}$ 。
 被験者別に示す。黒丸は、各波長に対する比 r の平均値、縦棒は標準偏差を示す。
 実線は Table 3.3 の $T_0, T_c, \Delta\lambda_c/\Delta\lambda_0$ の平均値を表わす。

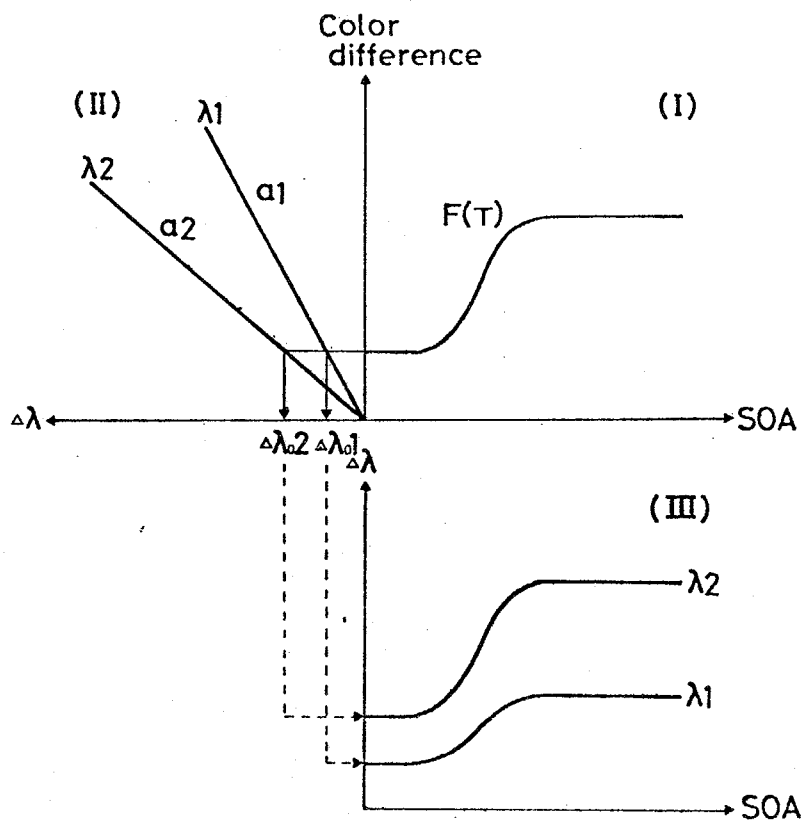


Fig. 5.3 色差のモデルの説明図。詳細は本文参照。

ることになる。(I)図の色差の変化を $F(T)$ とし、(II)図での各波長 λ_1, λ_2 の直線の傾きを a_1, a_2 とおくと、(III)図の曲線は λ_1 では $\Delta\lambda = 1/a_1 \cdot F(T)$ 、 λ_2 では $\Delta\lambda = 1/a_2 \cdot F(T)$ となる。ここで(III)図の $\Delta\lambda$ 値の変化から各々の波長での比 $V = \Delta\lambda / \Delta\lambda_0$ をとると、 $\Delta\lambda / \Delta\lambda_{01} = \Delta\lambda / \Delta\lambda_{02} = F(T) / F(0)$ となり、(I)図の $F(T)$ の形が求まることになる。

比 V の SOA に対する変化の実測値は Fig. 5.1 に示してある。おびに見てきたように KU, HU とともに必ずしも V の値がなわち $F(T)$ の形は一意的に求まっておらず、波長による違いが大きい。しかし、色の継時比較では平均すると約2倍の色差まで、その違いの許容度が増えといえよう。波長間での $F(T)$

の違いが、(E) 図で示される $\Delta\lambda$ と色差の線形関係が異なるためか、あるいは 2 色の同時比較で決まる色差と、継時比較で決まる色差が全く異なるメカニズムで決まっているためによるのかは、これからの研究に待たねばならない。しかし、継時的な色の比較と色差の変化でとらえることは、応用的な意味での色差の許容度を考える上でも重要なことであろう。

[呈示持続時間 D の影響]

次に呈示持続時間 D の波長弁別閾値 $\Delta\lambda$ に及ぼす影響について検討してみる。Table 3.3, 3.4 の T_0 と各 D の条件で比べると、 $D=55, 110, 220$ msec で平均値はそれぞれ、50, 60, 68 msec となっており、D の増加とともにおおむね増大の傾向がみられる。しかし、2 倍、4 倍という D の値の増大の大きさに比べると無視できる差であると考えられる。時間遅れが T_0 のところでは $D=55$ msec では左右の視野の呈示にほとんど時間的重なりがなく、 $D=110$ msec では 40%、 $D=220$ msec では 70% の時間的重なりがある。それにもかかわらぬ、3 者の条件で同様に $\Delta\lambda$ が T_0 の時点から増大していくのは、2 刺激の呈示開始間の時間遅れが、視覚系の継時的弁別能にとって意味のある量であり、刺激の物理的な呈示の重なりは左程重要でないことを示している。これは短期記憶の保持時間が刺激呈示の開始時点から決まるとある DiLollo (1977), DiLollo and Wilson (1978) らの報告とも一致する結果である。

Fig. 3.11 とみると、D が増大するにつれて $\Delta\lambda$ の値そのものは、ほとんどの SOA の点で減少していくことがわかる。SOA = 0 msec の同時呈示の場合、呈示時間が増大すると、波長弁別閾値が減少することは Siegel (1965) の報告とも一致している。ここでも同様に $\Delta\lambda_c/\Delta\lambda_0$ を計算すると Table 3.4 に示されているように、 $D=55, 220$ msec とともに、約 1.9 となる。この値は $D=110$ msec の場合の平均値と等しく、波長弁別能は呈示時間によらず同時呈示の場合の約 2 倍だけ劣化することが明らかとなった。

[応答曲線の傾き σ の値]

ここで再び Fig. 3.7 で示された被験者の応答曲線にもとって、応答曲線の傾きについて考える。傾きは応答曲線である累積正規分布曲線の標準偏差 σ で代表することができ、この σ の値を KU, $D=110$ msec の場合で計算し、

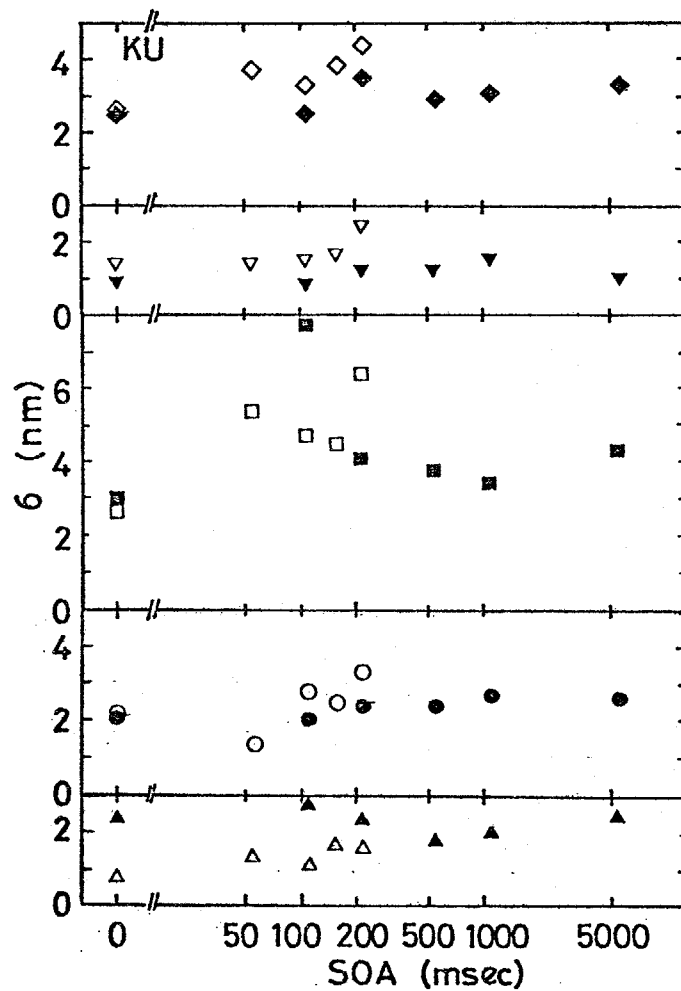


Fig. 5.4 σ の SOA に対する変化。KU, $D=110$ msec。▲, △: 430 nm, ●, ○: 470 nm, ■, □: 520 nm, ▼, ▽: 570 nm, ◆, ◇: 610 nm。黒, 白シンボルはそれぞれシリーズ (1), (2) の結果を表わす。

プロットすると、Fig. 5.4になる。これは、左右の2本の曲線の標準偏差の平均値をとってある。同一の波長における σ の値のSOAに対するシステムティックな変化はほとんどない。テスト波長の違いによる σ の値の変化は、 $\Delta\lambda$ の値の変化とほぼ一致しており、そのためこの σ の値を波長弁別閾値とする試みもある(Siegel, 1962)。しかし、 σ の値はむしろ被験者が閾値を決める際の判断のしやすさ、正確さというものを表わす量に相当し、その点 $\Delta\lambda$ の誤差評価の基準を与える量といえるだろう。実際にこのような試みもいくつかあるが、統計学的に論争の多い問題であるといわれている(Guilford, 1959)。

5.2 実験IIの考察

Fig. 3.15 および Fig. 3.16 に示されているように、波長弁別閾値は継時比較の方が同時比較よりも大きな値をとり、波長弁別能は継時比較するとすべての波長で劣化あることが明らかとなった。実験Iでは、波長弁別能の劣化を表わすために $\Delta\lambda_0$ と $\Delta\lambda_c$ の比をとり、5波長を平均すると約1.9となった(Table 3.2)。そこで本実験でも、SOA=0msecの $\Delta\lambda$ の値を $\Delta\lambda_0$ 、SOA=550msecの値を $\Delta\lambda_c$ とし、 $r = \Delta\lambda_c / \Delta\lambda_0$ をとり、実験Iの結果と比較する。Fig. 5.5に各波長別の r の値がプロットしてある。横軸は λ 、縦軸は r 、各シンボルは各被験者の値、破線は被験者別の r の値の平均値を表わす。 r の値は3人の被験者共通して450, 500nm付近でやや大きく、570nm付近で多少小さいが、すべての波長で平均すると図中の一点鎖線で示されるように2.3となり、実験Iの結果に近い値となる。

図中の白シンボルは、実験Iの結果と比較するためTable 3.3の r の値をプロットしたもので、KUの610nm, HUの430, 520nmで両者の違いはあるが、その他はほぼ近い値になっている。本実験で求めた弁別閾値の

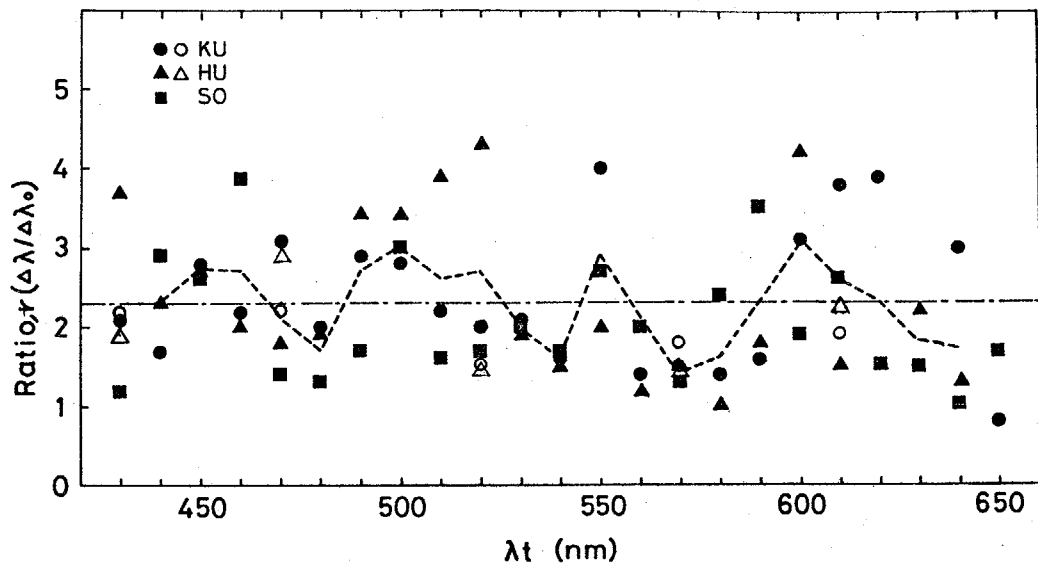


Fig. 5.5 3被験者の各テスト波長 λ_t に対する比 $r(\Delta\lambda_c/\Delta\lambda_o)$ の値(黒シンボル)とその平均値(破線)。白シンボルは実験Iの結果(Table 3.3)。

増大を表わす比 r の値 2.3 を Newhall et al. (1957) のデータと比較してみる。1.2 節で述べたように彼らは x, y 色度図上での継時比較と同時比較の楕円の平均面積比が 6.2、1次元方向では 2.5 になると報告している。本実験で求めた継時と同時の波長弁別閾値を x, y 色度図上に表わし、比をとると 2.3 となり Newhall らの値とほぼ近い値となっている。したがって継時比較の時間遅れが数十 sec というオーダーになっても、色の弁別能の劣化はこれ以上進まないと考えられる。

以上では、同時と継時の弁別閾数の比較のために両者の比をとって、その値が約 2.3 になることを示したが、波長間、被験者間のばらつきがやや多かった。そこで、ここでは異なるアプローチで両者の弁別閾数の違いを定量化してみる。

波長弁別閾数の理論的説明の中に反対色理論に基づいた色覚モデルによる方法がある (Boynton, 1979; Hurvich and Jameson, 1955; Bouman

and Walraven, 1962; Walraven and Bouman, 1966)。ここでは、その中の一つの Boynton (1979) の色覚モデルを用いて本実験の結果の測定点にフィットする波長弁別関数を求めてみる。弁別関数の具体的な求め方は付録Vに示すことにして、Fig. 5.6に求めた関数と測定点とともに示す。測定点は、黒丸が SOA=0msec, 白丸が SOA=550msec の結果で3人の被験者の平均値を用いた。図中460nmから500nmの範囲での曲線は y-b チャンネル、それ以外の範囲での曲線は r-g チャンネルによる弁別曲線である。図をみると、同時比較の場合も、継時比較の場合も、450nm 以下の短波長側を除き、よく一致しているといえる。継時比較の測定点の弁別関数は同時比較の場合に対して r-g チャンネルは2.1倍、y-b

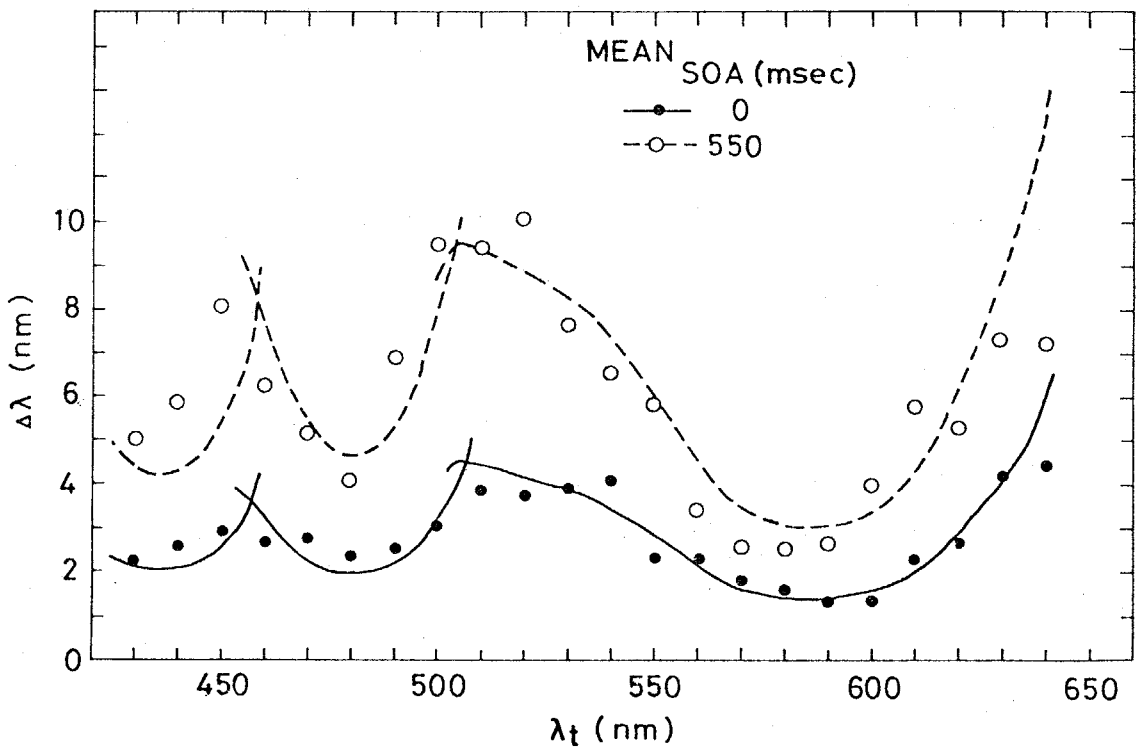


Fig.5.6 実験IIの結果(平均値)と Boynton (1979) の色覚モデルにもとづいた弁別関数。

チャンネルでは 2.4 倍になっている。Table 5.1 に 3 被験者 及び平均値に弁別閾値をフィットさせた場合の r-g, y-b チャンネルの比 r の値を示している。どの被験者でも r の値は両システムとも、約 2 になっているが、y-b の方が r-g より弁別閾値の増大が大きく、実験 I での 470 nm で弁別の劣化が大きく、520, 570 nm で小さいという結果とも一致しているといえる。ここでは同時波長弁別閾値と同時波長弁別閾値の説明と 2 波長が弁別されるのに必要な r-g, y-b チャンネルの出力に対する閾値を変えることだけで行なった。したがって、色の同時比較の場合は両システムの閾値が同時比較の場合に比べて 2 倍になる。すなわち、許容色差が 2 倍になると考えられるだろう。

Table 5.1 3 被験者及び平均値にあてはめた同時弁別閾値と同時弁別閾値の比 r の値。r-g, y-b チャンネルで別々に比をとった。

	r-g	y-b
KU	2.3	2.6
HU	2.1	2.5
SO	1.8	2.3
Mean	2.1	2.4

Fig. 3.14 の SOA=0msec の場合の $\Delta\lambda_l$, $\Delta\lambda_s$ 閾値をみると、3 人の被験者共にこの閾値は上下に非対称ではなく、明らかに下法にシフトしている傾向にある。考えられる原因の一つに実験手順によるものがある。実験はすべての波長で $\Delta\lambda_s$ を先に $\Delta\lambda_l$ を後に求めた。 $\Delta\lambda_s$ を求める場合には視野の右側は $\lambda_t, \lambda_{d1}, \lambda_{d2}$ が呈示され、 λ_t を中心にした色に順応されるが、視野の左側は $\lambda_t, \lambda_{d1}, \lambda_{d2}$ の各々より明らかに短波長側の比較波長が呈示され、右側より閾値の差だけ、短波長側の色に順応されることになる。したがって次に $\Delta\lambda_l$ を求める場合には、視野の左、右に同一の波長を呈示しても左側は右側よりも、明らかに長波長側に見える。そのため、閾値を求める際に被験者は左側の比較波長と短波長側により近づける傾向を示すと考えられる。セッション間では 2, 3 分間以上の明順

応期を入れたが、色順応の除去が完全ではなかった可能性もある。SOA = 550msecの場合には以上の傾向が見られないのは刺激呈示間の時間間隔が長いために、毎回の呈示後色順応が回復し、色順応の蓄積効果が少ないためと考えられる。そこで、以上の色順応の効果と調べるために次の補足実験を行なった。被験者 KU, テスト波長 570 nm, SOA = 0msec としてみよう実際の

実験と逆方向に $\Delta\lambda_l, \Delta\lambda_s$ の順に閾値を求め (条件(A))、次に充分休けいを入れて $\Delta\lambda_s, \Delta\lambda_l$ の順に再び閾値を求めた (条件(B))。結果と Fig. 5.7 に示す。図が明らかなように条件(B)の結果は条件(A)に比べて下方方向にシフトしている。したがって比較刺激の呈示による色順応効果があると考えられ、Fig. 3.14 の一方向のシフトはこの効果で説明できる。条件(C)は再び日を替えて条件(B)を繰り返した結果である。 $\Delta\lambda_l, \Delta\lambda_s$ としてそれぞれ色順応の効果がない条件(A)での $\Delta\lambda_l$, 条件(B)での $\Delta\lambda_s$ を用いて $\Delta\lambda$ を計算すると 1.4 となり条件(B)では 1.00 で多少小さい値となる。

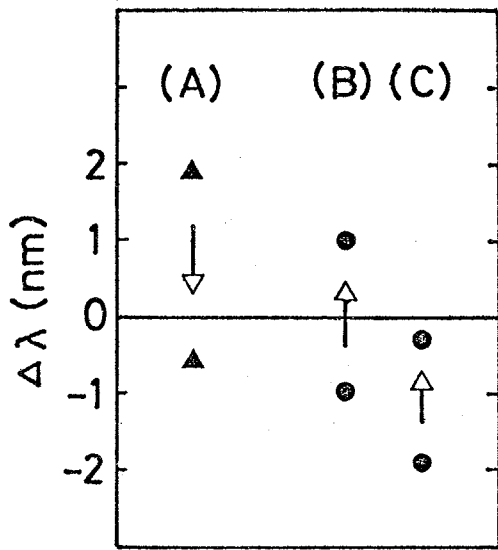


Fig. 5.7 比較刺激の呈示順による色順応効果の影響。(A): $\Delta\lambda_l, \Delta\lambda_s$ の順, (B): $\Delta\lambda_s, \Delta\lambda_l$ の順に測定。(C): (B)の条件で繰り返して測定。各条件で上側の点が $\Delta\lambda_l$, 下側の点が $\Delta\lambda_s$ を表わす。

しかし条件(C)では 0.78 であり同等の条件でもセッションが異なる場合と差があり、 $\Delta\lambda_s$ と $\Delta\lambda_l$ の値ではなく、平均値としての $\Delta\lambda$ を用いる上では、色順応効果は無視してすしつかえないと考えられる。

5.3 色の短期記憶

色の継時比較は、1.2節でも指適したように、色の記憶を用いた比較に他ならない。したがって、波長弁別閾値が継時比較によって増大するのは、記憶の中で正確に色の比較が行なわれぬ、換言すると色情報が視覚系内で正確に保持されなくなつた結果であると考えることができる。この視覚系による色情報の保持は Fig. 3.9 で表わされるように 0~60 msec までは劣化なしに、60~190 msec までに次第に劣化し、190 msec 以上では、ある程度のレベルで留まることが認められた。したがって、この結果から示唆されることは、視覚系内には、約60 msec という短い時間の色の記憶が存在し、その記憶の保持時間内には2色が入力され比較されると弁別が正確に行なわれるということである。

短い時間の記憶に関しては、視覚系に数百 msec という時間だけ情報を保持する機能、すなわち短期記憶 (VIS, visual information storage or iconic storage*) が存在することが、最近20年間に示されてきた。部分報告法による文字の認識 (Sperling, 1960; Averbach and Colliel, 1961), パターンの部分分割呈示によるパターン認識 (Eriksen and Collins, 1967; Haber and Standing, 1969; Hogben and DiLollo, 1974; Ikeda and Uchikawa, 1978; Ikeda et al. 1979; 内川 と Andrews, 1980) などの実験はその例で、多種多様な実験方法を使って、短期記憶の存在を示すとともに、その時間特性も情報保持時間が約100 msec から 500 msec というようになりに明らかなにしている。これに伴い Fig. 5.8 に示すような記憶のモデルが提唱され (Sperling, 1963, 1967) 最近では一般的に認められている (Lindsay and Norman, 1974; Haber and Hershenson, 1973)。このモデルによると、視覚情報はまず感覚器である眼球を通り、その後変換を受け、短期記憶 (VIS), 続いてより高次レベルに送られる。VIS には、入力された視覚情報を見えの形のままで数百 msec 間保持し、さらにこの時間内に入力された情報をたし、水情報保持時間が数百 msec の記憶は visual information storage あるいは iconic storage などと呼ばれ、short-term memory はそれ以後のより長い情報保持時間をもつた記憶を表わす場合が多い。

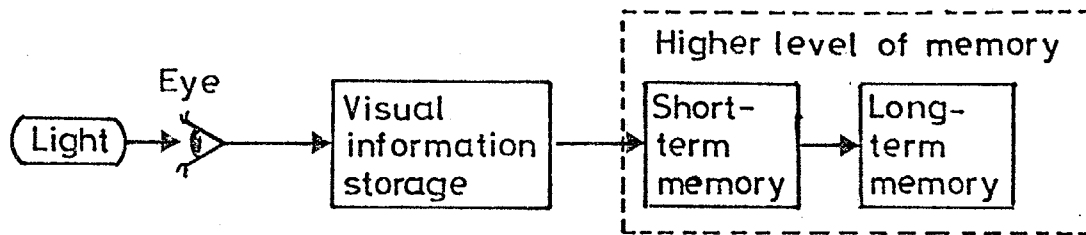


Fig. 5.8 記憶のモデル。

合わせ、一つの見えと形成あるといった機能がある。継時的に呈示された視覚情報も呈示の時間遅れがこのVISの保持時間以内であればたし合わせられ、同時呈示の場合と同様な“見え”が生じることになる。上記の多くの実験結果はこのVISによる情報保持と、たし合わせの働きで解釈されている。そこで本実験で明らかとなった継時的な波長弁別閾値の変化もこのモデルによって、次のような解釈を試みた。まず、第一の刺激が眼球を通りVISに入力される。そこで刺激は入力の時点から約60msec間は正確に保持されるが、その後には次第に減衰し、情報はより高次のレベルへ送られ記憶される。第二の刺激が、第一の刺激より約60msec以内の時間遅れで入力されれば、このVIS内で2刺激の比較ができ、波長弁別も正確に行なわれる。しかし、第二の刺激の時間遅れが約60msec以上であれば、第二の刺激がVISに入力された時点では、第一の刺激はすでに減衰をはじめており、VIS内では弁別が正確に行なわれない。そのため、より高次の記憶レベルで2刺激は比較されることになり、弁別能は劣化する。高次の記憶レベルでは弁別はVIS内ほど正確に行なわれないが情報を長い時間保持することができ、弁別閾値も約190msec以上ではほとんど一定となる。1.2節で述べた長い時間遅れでの色の継時比較の実験結果も(Newhall et al., 1957; Burnham and Clark, 1954, 1955)短期記憶内の色情報の消失と考えると説明がつく。したがって、実験Ⅱで示された同時弁別閾数はVISでの特性であり、継時弁別閾数は

より高次の記憶レベルでの特性であることになる。

この解釈は VISI 内の波長弁別とより高次のレベル内での波長弁別というように、二つの異なるメカニズムでの弁別を仮定し、前者の弁別能が後者のものよりも優れているとしている。このように複数の刺激が、同時あるいは短い時間内で呈示された場合の処理と継時的に長い時間内で呈示された場合の処理が視覚系内で異なっているとある考え方は、Ikeda and Uchikawa (1978) の行なった分割呈示によるパターン認識の研究にも採用されており、入力情報の如何にかかわらず、視覚系の情報処理の一般的な性質を表わすものであろう。

本実験で示した約 60 msec という色の情報保持時間幅は、これまで示されてきたパターン認識に必要な情報保持時間に比べると多少短い結果となっている (Haber and Standing, 1967; Hogben and DiLollo, 1974; Ikeda and Uchikawa, 1978)。しかし、保持時間の値は、使用した刺激の明るさ、パターンの種類、判断基準などといった実験条件に強く依存しており、一概に色の記憶時間が短いとは結論できない。むしろ本実験で求めた値は、認識における短期記憶の保持時間に近い値を示しており、色の記憶もパターンの記憶と少なくとも保持時間に関してはそれほど差がないと言えよう。

5.4 応用面からの検討

1.2 節でも指摘したように我々は日常的には、継時的に色の比較を行なっている。また工業製品の色の検査を行なう場合には検査官が標準色票と製品とを見比べている。またわれわれ空間的に多少離れた2色と比較していることになる。空間的に離れた2色は眼球、あるいは頭と移動させることにより注視点を移動し、比較される。ここでは、そういった実際的な状況をより詳しく述べ、本研究で求めた継時的波長弁別関数の実際場面への適用性を検討していく。

Fig. 5.9に示すような空間的に離れた2色A, Bと比較する場合を考えよう。仮にA, Bの距離 d は 10° とする。網膜周辺 10° のところでは色弁別能も中心窩に比べて波長弁別閾値約10倍ほど悪くなり(Weale, 1951)、物体A, Bを同時に正確に比較することは困難となる。そこで我々は、眼球を動かし、2色と比較することになる。AからBに注視点を移動することを考えると、 10° ならば約50 msecの跳躍運動(saccadic movement)

の時間がかかる。1つの位置に注視点が留まる時間、すなわち停留(fixation)時間は200~300 msecである(Yarbus, 1967)。したがって、Aを見始めてから 10° 離れたBに移動するまでに少なくとも約300 msecは時間がかかることになる。この300 msecという比較のための時間遅れは本実験結果で求めた、波長弁別閾値及び明るさの弁別閾値の劣化が一定となる時間遅れの約200 msecよりも大きい。したがって、我々は実際にはかなりの時間遅れを伴って、色と比較しており、その時間遅れによって色の弁別閾値は同時比較の場合よりも増大しているはずである。

Sharpe and Wyszecki (1976)は、二つの視野間に 41° の間隔をあげ、色の弁別閾値を測定し、間隔がない場合と比較した。視野はそれぞれ直径 1° の六角形である。Fig. 5.10は二刺激をカラーマッチングした結果

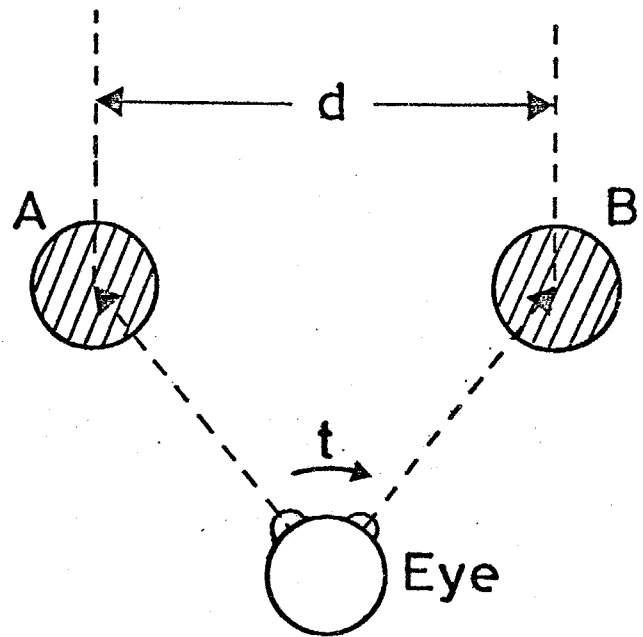


Fig. 5.9 空間的に d の距離にある2色A, Bと比較するためには、眼球運動が必要である。

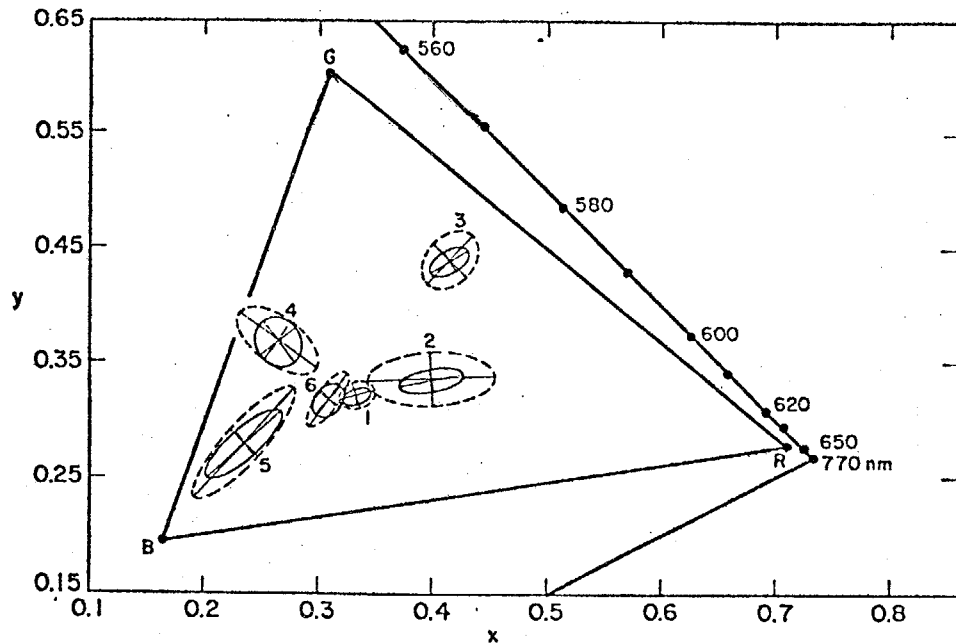


Fig. 5.10 2視野間に間隔を入れた場合の色弁別閾値の変化。実線は間隔が 0° の場合、破線は間隔が 4.1° の場合を示す (Sharpe and Wyszczeki, 1976)。

をxy色度図上に表わしたものである。図中の楕円がマッチングのばらつきを表わし、実線が間隔が 0° のもの、破線が間隔が 4.1° のものである。図を見ると明らかなように破線の楕円が広がっており、色弁別閾値が増大していることがわかる。両者の楕円の面積比をとると平均して2.5倍、一次元方向では1.6倍となっており、本実験で求めた値の約2.3倍、Newhall et al. (1957) の同時マッチングから求めた2.5倍と比べるとわずかに小さいが、明らかに空間的に離れた2色の弁別が劣化していることが認められる。したがって1.2節で述べたように現実の場面での色の比較でも色の短期記憶が用いられていることが改めて強く示唆され、本実験の結果が空間的に離れた2色の比較という応用的な面への基礎データを与えると考えられる。

国際照明委員会(CIE)の色覚委員会(TC.1.3)では色差式と決定するにあたり基準となる色弁別の実験の各種のパラメータの選定方法についての目安

を発表している (Robertson, 1978)。その中にサンプルの間隔の項があり、2刺激の空間的距離が弁別にとり重要なパラメータであることを明示している。そこでもし、2刺激の間隔の影響が眼球運動による時間遅れに起因しているのであれば、本実験で求めた継時波長弁別閾値、及び継時明るさ弁別閾値は色差と決める上で重要な参考資料を与えると期待できる。

第6章 結論

本研究では人間の視覚系の波長弁別能を2色の比較に時間遅れを入れて測定し、その特性を明らかにした。以下に本研究の結論を列記する。

- (1) 電子計算機制御による光学系実験装置を製作し、色の短期記憶に基づく視覚系の継時的な波長弁別能を初めて測定した。光学系の2台のモノクロメータ、ウエッジを自動的に制御することで、刺激の任意の波長、明るさをあばやくセットでき、実験時間が大幅に短縮できた。その結果、精度の高い測定が可能となった。
- (2) 継時的な波長弁別能は、2刺激の呈示開始時間遅れが、約60msecから190msecで劣化、その後ほぼ一定になることを示し、色の短期記憶の時間特性が求められた。また、この特性は刺激の呈示時間が55から220msec間では、ほとんど変化しないことを示した。
- (3) 継時波長弁別閾値と同時波長弁別閾値を求め、弁別閾値の継時変化の波長依存性を示した。また、両者の閾値と比較して波長の弁別限界が、継時比較の場合には、約2倍になることを明らかにした。
- (4) 継時的な明るさの弁別を補足として実験し、波長弁別の場合と同様に明るさの弁別能も2刺激の呈示開始時間遅れと共に、劣化していくことが明らかになり、したがって本実験で求めた時間特性は明るさを含んだ“色”の時間特性に拡張されることが示された。
- (5) 本実験で求めた 継時波長弁別閾値の応用的意味を検討した。色の記憶を

用いた2色の比較は、空間的に離れた2色の比較と類似性が強いことを示し、空間的に併置された2色の色差の許容限界を決める際の一つの基礎データを与えると期待できる。

謝辞

本研究を終えるにあたり、着者の修士課程、博士課程を通して6年の長きにわたり、終始一貫して熱心な暖かい御指導を賜わった。池田光男教授に心から感謝の意を表したいと思ひます。池田光男教授には、研究直のみならず、日常生活を通して様々な御指導を受け、ここに合せて感謝致します。

池田研究室の近江政雄助手には、数多くの有益な助言及び御指導を頂き深謝致します。池田研究室の皆様にも、研究上の討論、被験者及び装置製作などで、協力して頂き感謝致します。特に池田研究室の大竹史郎氏、また日本女子大学の内川弘美氏には長い時間、被験者として実験に参加して頂き感謝致します。その他、本学の他の研究室の方々など、多くの皆様から援助を頂き、ここに心から感謝したいと思ひます。

最後に、着者が研究を進める上で長い間、経済的な援助、精神的な励ましを与えてくれた両親、また本論文をまとめるに際し、協力をしてくれた妻に感謝致します。

参考文献

- Alpern M. (1953) Metacontrast. J. Opt. Soc. Am. 43, 648-657.
- Averbach E. and Coriell A. S. (1961) Short-term memory in vision. Bell System Technical J. 40, 309-328.
- Baker K. E. and Mackintosh I. (1955) The influence of past associations upon attributive color judgments. J. exp. Psychol. 49, 281-286.
- Banks W. P. and Barber G. (1977) Color information in iconic memory. Psychol. Rev. 84, 536-546.
- Bartleson C. J. (1960) Memory colors of familiar objects. J. Opt. Soc. Am. 50, 73-77.
- Bedford R. E. and Wyszecki G. W. (1958) Wavelength discrimination for point sources. J. Opt. Soc. Am. 48, 129-135.
- Bouman M. A. and Walraven P. L. (1962) Quantum theory of colour discrimination of dichromates. Vision Res. 2, 177-187.
- Boynton R. M. (1979) Human color vision. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- Boynton R. M. and Gordon J. (1965) Bezold-Brücke hue shift measured by color naming technique. J. Opt. Soc. Am. 55, 78-86.
- Brown W. R. J. and MacAdam D. L. (1949) Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance difference. J. Opt. Soc. Am. 39, 808-834.
- Bruner J. S., Postman L. and Rodrigues J. (1951) Expectation and the perception of color. Amer. J. Psychol. 64, 216-227.
- Burnham R. W. and Clark J. R. (1954) A color memory test. J. Opt. Soc. Am. 44, 658-659.
- Burnham R. W. and Clark J. R. (1955) A test of hue memory. J. Appl. Psychol. 39, 164-172.

- CIE Technical Report (1977) Light as a true visual quality: principles of measurements. Prepared by the technical committee, TC1.4 in 1977 (unpublished).
- Clark S. E. (1969) Retrieval of color information from preperceptual memory. J. exp. Psychol. 82, 263-266.
- Collins M. (1931-32) Some observations of immediate colour memory. Brit. J. Psychol. 22, 344-352.
- Coltheart M., Lea C. D. and Thompson K. (1974) In diffence of iconic memory. Q. Jl. exp. Psychol. 26, 633-641.
- Delk J. L. and Fillenbaum S. (1965) Differences in perceived color as a function of characteristic color. Amer. J. Psychol. 78, 290-293.
- Dick A. O. (1969) Relations between the sensory register and short-term storage in tachistoscopic recognition. J. exp. Psychol. 82, 279-284.
- Di Lollo V. (1977) Temporal characteristics of iconic memory. Nature 267, 241-243.
- Di Lollo V. and Wilson A. E. (1978) Iconic persistence and perceptual moment as determinants of temporal integration in vision. Vision Res. 18, 1607-1610
- Eriksen C. W. and Collins J. F. (1967) Some temporal characteristics of visual pattern perception. J. exp. Psychol. 74, 476-484.
- Guilford J. P. (1959) 精神測定法 (秋重義治訳), 培風館, 東京.
- Haber R. N. and Hershenson M. (1973) The psychology of visual perception. Holt, New York.
- Haber R. N. and Standing L. G. (1969) Direct measures of short-term visual storage. Q. Jl. exp. Psychol. 21, 43-54.

- Hanawalt N. G. and Post B. E. (1942) Memory trace for color. J. exp. Psychol. 30, 216-227.
- Harper R. S. (1953) The perceptual modification of colored figures. Amer. J. Psychol. 66, 86-89.
- Hogben J. H. and Di Lollo V. (1974) Perceptual integration and perceptual segregation of brief visual stimuli. Vision Res. 14, 1959-1069.
- Hurvich L. M. and Jameson D. (1955) Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. II. Brightness, Saturation, and hue in normal and dichromatic vision. J. Opt. Soc. Am. 45, 602-616.
- 池田光男 (1975) 視覚の心理物理学, 森北出版, 東京.
- Ikeda M. and Nakashima Y. (1979) Wavelength difference limit for binocular fusion. Vision Res. (in preparation).
- Ikeda M. and Uchikawa K. (1978) Integrating time for visual pattern perception and a comparison with the tactile mode. Vision Res. 18, 1565-1571.
- Ikeda M., Uchikawa K. and Saida S. (1979) Static and dynamic functional visual fields. Optica Acta 26, 1103-1113.
- 瀬正巳 (1953) 誤差論, 培風館, 東京.
- Kahneman D. (1968) Method, findings, and theory in studies of visual masking. Psychol. Bulle. 70, 404-425.
- Lindsay P. H. and Norman D. A. (1974) Human information processing. Academic Press, New York.
- MacAdam D. J. (1942) Visual sensitivities to color differences in daylight. J. Opt. Soc. Am. 32, 247-274.

- McCree K. J. (1960(a)) Color confusion produced by voluntary fixation. Optica Acta 7, 281-290.
- McCree K. J. (1960(b)) Small-field tritanopia and the effects of voluntary fixation. Optica Acta 7, 317-323.
- 中島芳雄 と 池田光男 (1980) 色の両眼融合限界. 光学 9. (印刷中)
- Newhall S. M., Burnham R. W. and Clark J. R. (1957) Comparison of successive with simultaneous color matching. J. Opt. Soc. Am. 47, 43-56.
- Robertson A. R. (1978) CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation. Color Res. Appl. 3, 149-151.
- Sharpe L. T. and Wyszecki G. (1976) Proximity factor in color-difference evaluations. J. Opt. Soc. Am. 66, 40-49.
- Siegel M. H. (1962) Discrimination of color. I. Comparison of three psychophysical methods. J. Opt. Soc. Am. 52, 1067-1070.
- Siegel M. H. (1963) Discrimination of color. III. Effect of spectral bandwidth. J. Opt. Soc. Am. 53, 874-877.
- Siegel M. H. (1964) Discrimination of color. IV. Sensitivity as a function of spectral wavelength, 410 through 500 mu. J. Opt. Soc. Am. 54, 821-823.
- Siegel M. H. (1965) Color discrimination as a function of exposure time. J. Opt. Soc. Am. 55, 566-568.
- Siegel M. H. and Dimmick F. L. (1962) Discrimination of color. II. Sensitivity as a function of spectral wavelength, 510 to 630 mu. J. Opt. Soc. Am. 52, 1071-1074.
- Smith V. C. and Pokorny J. (1975) Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. Vision Res. 15, 161-171.

- Spering G. (1960) The information available in brief visual presentation. Psychol. Monogr. 74, 1-29.
- Spering G. (1963) A model for visual memory tasks. Human Factors 5, 19-31.
- Spering G. (1967) Successive approximations to a model for short term memory. Acta Psychol. 27, 285-292.
- Traub A. C. and Balinkin I. (1961) Proximity factor in the Judd color difference formula. J. Opt. Soc. Am. 51, 755-760
- 内川 憲二 と Andrews D. P. (1980) シェブロン図形認識における時間的たし合わせ特性. 光学 9 (※2号掲載予定)
- von Wright J. M. (1968) Selection in visual immediate memory. Q. Jl. exp. Psychol. 20, 62-68.
- Walraven P. L. and Bouman M. A. (1966) Fluctuation theory of colour discrimination of normal trichromats. Vision Res. 6, 567-586.
- Weale R. A. (1951) Hue-discrimination in para-central parts of human retina measured at different luminance levels. J. Physiol. 113, 115-122.
- Weale R. A. (1953) Spectral sensitivity and wave-length discrimination of the peripheral retina. J. Physiol. 119, 170-190.
- Wright W. D. (1927-28) A trichromatic colorimeter with spectral primaries. Transac. Opt. Soc. 24, 225-243.
- Wright W. D. and Pitt F. H. G. (1934) Hue-discrimination in normal color-vision. Proc. Phys. Soc. (London) 46, 459-473.
- Wright W. D. (1941) The sensitivity of the eye to small colour difference. Proc. Phys. Soc. (London) 53, 93-112.

Wright W. D. (1945) Colour sensitivity of the fovea centralis. Nature 156,
119-121.

Wyszecki G. and Fielder G. H. (1971) New color-matching ellipses.
J. Opt. Soc. Am. 61, 1135-1152.

Wyszecki G. and Stiles W. S. (1967) Color Science. Wiley, New York.

Yarbus A. L. (1967) Eye movements and vision (edited and translated by
Riggs L. A. and Haigh B.). Plenum Press, New York.

関連論文 及び 学会講演

〔関連論文〕

Ikeda M. and Uchikawa K. (1978) Integrating time for visual pattern perception and a comparison with the tactile mode. Vision Res. 18, 1565-1571.

Ikeda M., Uchikawa K. and Saida S. (1979) Static and dynamic functional visual fields. Optica Acta 26, 1103-1113.

内川 恵二 と Andrews D. P. (1980) シェブロン図形認識における時間的たし合わせ特性 光学 9. (第2号掲載予定)

Uchikawa K. and Ikeda M. (1980) Temporal deterioration of wavelength discrimination with the successive comparison method. Vision Res. (in preparation).

〔学会講演〕

内川 恵二, 池田光男 分割絵素呈示法によるパターン認識の研究 第36回応物 1975.11

内川 恵二, Andrews D. P., 池田光男 シェブロン図形によるパタン認識の時間特性の研究 第37回応物, 1976.10

Bebko J. M., 内川 恵二, 池田光男 A visual perspective on learning. 第38回 応物. 1977.10

内川 恵二, 池田光男 継時的な波長弁別による色の記憶の時間特性の研究 第39回 応物. 1978.11

内川 恵二, 池田光男 継時的な波長弁別 第26回応物連合, 1979.3

内川 恵二, 池田光男 継時比較における波長弁別能の変化 第13回照学 1980.3 (発表誌)

〔研究会報告書〕

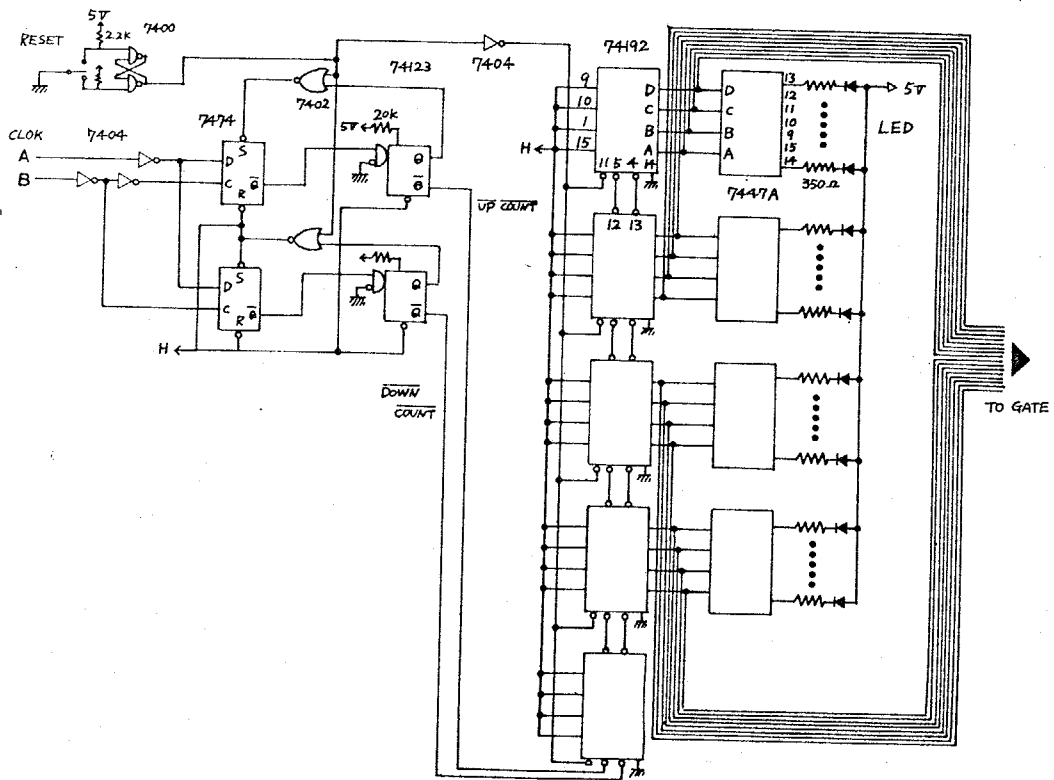
池田光男, 内川 恵二 分割絵素法によるパターン認識の研究 電子通信学会画像工学研究会 (IE76-77) 1977.2

池田光男, 内川 恵二 分割絵素法によるパタン認識の研究 文部省科学研究費補助金. 昭和51年度総合研究(A)研究成果集録 1977.3

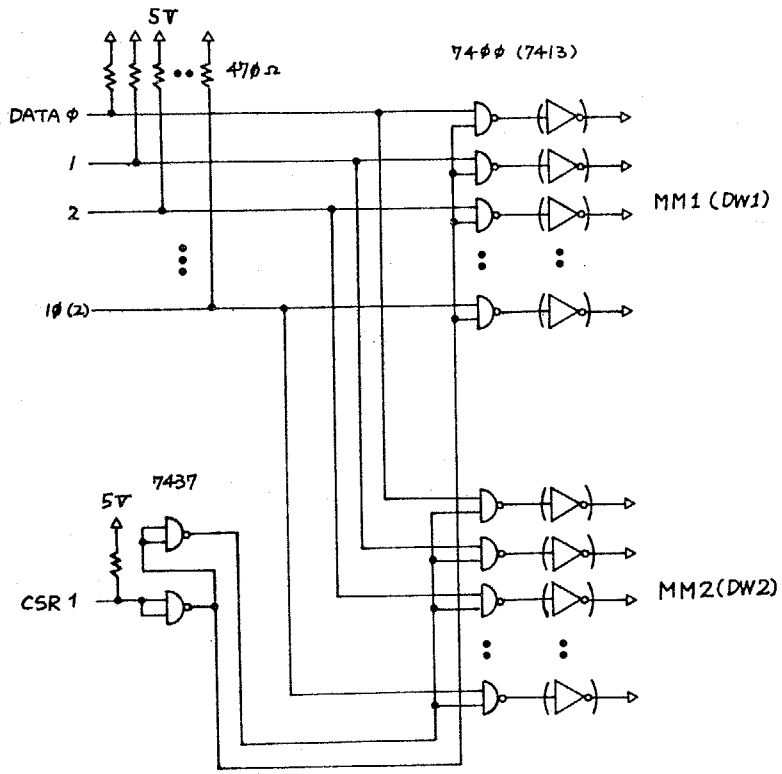
付録I 回路図

以下. Fig. A1(a)~(e) に. 自作した主要部分の回路図を示す。

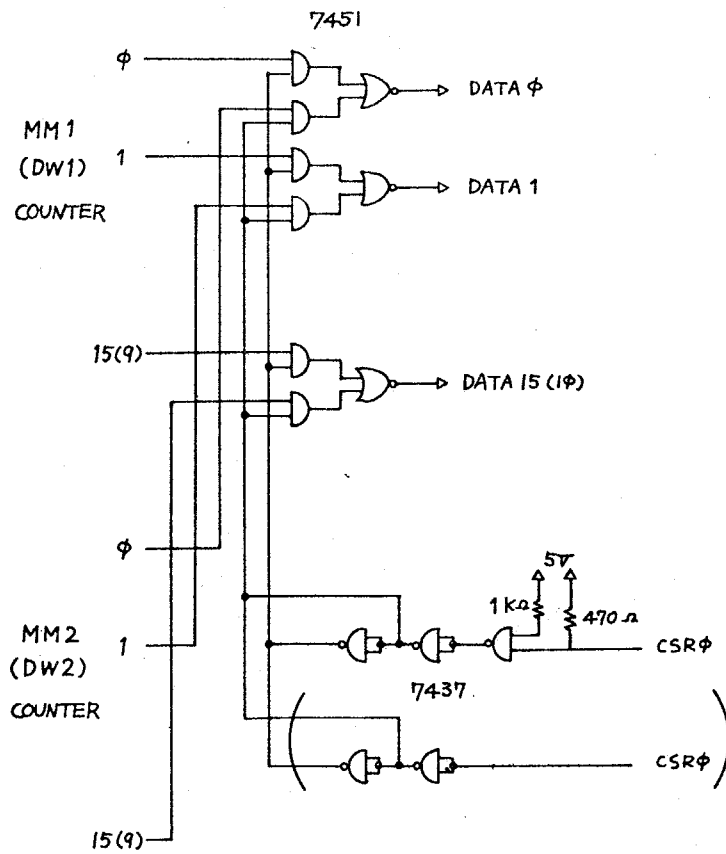
(a)



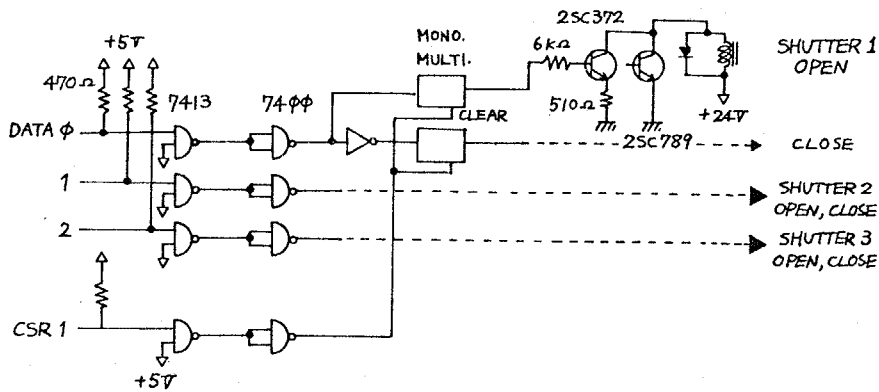
(b)



(c)



(d)



(e)

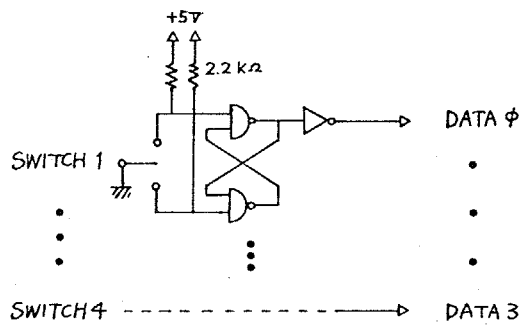


Fig. A1 (a) モノクロメータのカウンター, LEDディスプレイ部

(b) モノクロメータ及びウエッジに対するインターフェイスとコントロール部間の接続部。()内はウエッジの場合のみに用いられる。

(c) モノクロメータ及びウエッジに対するインターフェイスと読み取り部(LED DISP)間の接続部。()内はウエッジの場合。

(d) シャッター1,2,3のコントロール部。ブザーのコントロールも同様のものを用いた。

(e) スイッチ部。

付録Ⅱ 制御プログラム

2.3.2項で示した制御プログラムフローチャートの、実際のプログラムを以下プログラム(a)(b)に示す。

プログラム(a) モノクロメータとウエッジの制御プログラム。

```

      サブルーチン SMOWG2
; SUBROUTINE /SMOWG2.MAC/
;
; .NCALL ..V2...REGDEF
; ..V2..
; .REGDEF
; .GLOBL SMOWG2
;
; READ MONO#, WEDG#
;
SMOWG2: ADD #2, R5
RNMONO: MOV @(R5)+, R0
        BNE NMONO1
NMONO0: MOV #0, @CSR1
BR RNWEDG
NMONO1: MOV #3, @CSR1
RNWEDG: MOV @(R5)+, R0
BNE NWEDG1
NWEDG0: MOV #0, @CSR2
BR RWLTH
NWEDG1: MOV #3, @CSR2
;
; READ FINAL WLTH
; CONVERT TO BCD
;
RWLTH: MOV @(R5)+, R0
CLR R2; R2=WLTH BCD OUTPUT
CLR R4; R4=COUNTER (0, 1, 2, 3)
BCD: MOV R0, R1
CLR R0
DIV #10., R0; R0=QUOTIENT, R1=REMAINDER
MOV R4, R3
MUL #4, R3; R3=COUNTER (0, 4, 8, 12)
LP1: TST R3
BEQ SUM
CLC
ROL R1
DEC R3
BR LP1
SUM: ADD R1, R2
INC R4
CMP #4, R4
BNE BCD
MOV R2, WLBCD
;
; READ FINAL WS & CONVERT TO BCD

```

```

      サブルーチン SMOWG3
;
; SUBROUTINE /SMOWG3.MAC/
;

```

次ページに示るようにより一部は
変更がある。

```

;
RWS:MOV @(R5)+,R0
MOV R0,R5;R5=FINAL WS(BNR)
CLR R2;R2=WS BCD OUTPUT
CLR R4;R4=COUNTER(0,1,2,3)
BCDWS: MOV R0,R1
CLR R0
DIV #10.,R0;R0=QUOTIENT,R1=REMAINDER
MOV R4,R3
MUL #4,R3;R3=COUNTER(0,4,8,12)
LPIWS:TST R3
BEQ SUMWS
CLC
ROL R1
DEC R3
BR LPIWS
SUMWS: ADD R1,R2
INC R4
CMP #4,R4
BNE BCDWS
MOV R2,WSBCD
;
MOV #0,IWSCAN
MOV #0,IMSCAN
;
;READ PRESENT WL
;
RPWL:MOV @INBUF1,R0;R0=PRESENT WL(BCD)
COM R0
;
;READ PRESENT WS
;
RPWS:MOV @INBUF2,R2;R2=PRESENT WS(BCD)
COM R2
BIC #176000,R2
;
;MONOCHRO SCAN
;
MONOS: CMP WLBCD,R0
BEQ MSSTOP
BLT MREV
MNOR:MOV #2023,@OTBUF1
MOV #1,IMSCAN
BR WEDGS
MREV:MOV #2025,@OTBUF1
MOV #-1,IMSCAN
BR WEDGS
MSSTOP: CLR @OTBUF1
TST IMSCAN
BLT MREV2
TST IWSCAN
BNE HTIME1
CMP WSBCD,R2
BEQ WSSTP

```

サテライト SMOWG3. MAC の場合は
 以下のように #2023 が #2043 に、
 #2025 が #2045 になる。

```

MNOR:MOV #2043,@OTBUF1
MOV #1,IMSCAN
BR WEDGS
MREV:MOV #2045,@OTBUF1

```

```
;
;WEDGE SCAN
;
WEDGS:TST IWSCAN
BNE RPWL
CMP WSBCD,R2
BEQ WSSTP2
BLT WREV
WNOR:MOV #5,@OTBUF2
BR RPWL
WREV:MOV #6,@OTBUF2
BR RPWL
WSSTP2: CLR @OTBUF2
MOV #1,IWSCAN
BR RPWL
;
WSSTP:CLR @OTBUF2
BR HTIME1
;
MREV2:MOV #2025,@OTBUF1
CLR @OTBUF2
MOV #77777,R4
LP4:DEC R4
ENE LP4
CLR @OTBUF1
BR WEDGS
;
HTIME1:MOV #177777,R4
LP5:DEC R4
ENE LP5
;
;READ PRESENT WS AGAIN &
;CONVERT TO BNR
;
RPWS2:MOV @INBUF2,R0
COM R0
BIC #176000,R0;R0=PRESENT WS (BCD)
CLR R2;R2=WS OUT (BNR)
MOV #MULNUM,R3;(R3)=1,10.,100.,0
BINARY:MOV R0,R1
CLR R0
DIV #16.,R0;R0=QUOTIENT,R1=REMAINDER
MUL (R3)+,R1
ADD R1,R2
TST (R3)
BNE BINARY
      CLR R1
```

```
;
MOV R5,R0;R5=FINAL WS(BNR)
SUB R2,R0
BEQ FIN
BLT WREVP
WNORP:MOV #1,@OTBUF2
BR STEP
WREVP:NEG R0
MOV #2,@OTBUF2
STEP:MOV #160,R1
LOOP1:DEC R1
BNE LOOP1
CLR @OTBUF2
MOV #102060,R1
LOOP2:DEC R1
BNE LOOP2
DEC R0
BR RPWS2
;
FIN:RTS PC
CSR1:167770
CSR2:167760
OTBUF1: 167772
OTBUF2: 167762
INBUF1: 167774
INBUF2: 167764
WLBCD: .BLKW 1
WSBCD:.BLKW 1
IMSCAN:.BLKW 1
IWSCAN: .BLKW 1
MULNUM: .WORD 1,10.,100.,0
.END
```

プログラム(b) シャッターの制御プログラム

サブルーチン SSHMC1

```

C
C   SUBROUTINE FOR SHUTTER MAIN CONTROL-1 /SSHMC1.FOR/
C
C   SUBROUTINE SSHMC1(D0,D1,D2,SOA1,SOA2)
C
C   DIMENSION ONOFF(6),IONOFF(6),DATA(6),ID(6),IORD(6),
1      INORD(6),IMODE(6),IBIT10(3),ITP(6)
C
      ONOFF(1)=0.
      ONOFF(2)=D0
      ONOFF(3)=SOA1
      ONOFF(4)=SOA1+D1
      ONOFF(5)=SOA2
      ONOFF(6)=SOA2+D2
      DO 20 I=1,6
      DATA(I)=ONOFF(I)
20  CONTINUE
C
      DO 10 I=1,6
10  ID(I)=I
      DO 11 I=1,5
      DO 11 J=I,5
      IF(DATA(I).LE.DATA(J+1)) GO TO 11
      WORK=DATA(I)
      IWORK=ID(I)
      DATA(I)=DATA(J+1)
      ID(I)=ID(J+1)
      DATA(J+1)=WORK
      ID(J+1)=IWORK
11  CONTINUE
      J=1
      IORD(1)=1
      DO 12 I=1,5
      IF(DATA(I).NE.DATA(I+1)) J=J+1
      IORD(I+1)=J
12  CONTINUE
      DO 21 I=1,6
      N=ID(I)
      IONOFF(N)=IORD(I)
21  CONTINUE
C
      IHIST=1
      DO 15 I=1,6
      IF(IONOFF(I).GT.IHIST) IHIST=IONOFF(I)
15  CONTINUE
      NTP=IHIST-1

```

C
C

```
DO 22 I=1,3
22 IBIT10(I)=0
DO 24 I=1,6
ITP(I)=0
IMODE(I)=0
24 INORD(I)=0
DO 26 I=1,IHIST
DO 25 J=1,6
IF(IONOFF(J).NE.I) GO TO 25
INORD(I)=J
IBIT1=(J-1)/2+1
IBIT10(IBIT1)=MOD(J,2)
25 CONTINUE
ISUM=0
DO 27 K=1,3
27 ISUM=ISUM+(2**(K-1))*IBIT10(K)
IMODE(I)=ISUM
26 CONTINUE
```

C

```
19 DO 16 I=1,NTP
J=INORD(I)
K=INORD(I+1)
ITP(I)=ONOFF(K)-ONOFF(J)
16 CONTINUE
```

C

```
D WRITE(7,1001) (INORD(I),I=1,IHIST)
D REWIND 7
D WRITE(7,1001) (ITP(I),I=1,NTP)
D REWIND 7
D WRITE(7,1001) (IMODE(I),I=1,IHIST)
D REWIND 7
D1001 FORMAT(6I5)
```

C

```
CALL SSHCRI(NTP,ITP,IMODE)
```

C

```
D WRITE(7,1002)
D1002 FORMAT(1H , 'RETURN FROM SSHCRI')
D REWIND 7
```

C

```
RETURN
END
```

サブルーチン SSHCR1

```

;
; SUBROUTINE /SSHCR1/ SHUTTER CONTROL FOR GENERAL USE
;
      .MCALL ..V2... .REGDEF
      ..V2..
      .REGDEF
      .GLOBL SSHCR1, LDRTN
SSHCR1: CLR @OTBUF3
        ADD #2, R5
        MOV @(R5)+, R0
        MOV #6, R1
        MOV #ITP, R2
        MOV (R5)+, R3
LP1:    MOV (R3)+, R4
        NEG R4
        MOV R4, (R2)+
        DEC R1
        BNE LP1
;
        MOV #6, R1
        MOV #IMODE, R2
        MOV (R5)+, R3
LP2:    MOV (R3)+, (R2)+
        DEC R1
        BNE LP2
;
        MOV #2, @CSR3
        MOV #10., R1
        NEG R1
        MOV R1, @KWBPR
        MOV #41, @KWCSR
LP4:    BIT #200, @KWCSR
        BEQ LP4
        CLR @KWCSR
;
        MOV #ITP, R1
        MOV #IMODE, R2
LP3:    MOV (R2)+, @OTBUF3
        MOV (R1)+, @KWBPR
        MOV #41, @KWCSR
LP5:    BIT #200, @KWCSR
        BEQ LP5
        CLR @KWCSR
        DEC R0
        BNE LP3
        CLR @OTBUF3
        MOV #0, @CSR3
        RTS PC
ITP:    .BLKW 6
IMODE:  .BLKW 6
CSR3:   167750
OTBUF3: 167752
KWCSR:  170420
KWBPR:  170422
        .END

```

付録Ⅲ 実験プログラム

実験に用いた実際のプログラムを 以下 プログラム (c) ~ (e) に示す。

プログラム(C) 明るさマッチング用プログラム

手続 I

```

C
C   BRIGHTNESS MATCHING TYPE-A4 /BMCHA4.FOR/
C   DURATION AND SOA ARE ANY NO.5
C   #2 PATH IS NOW AVAILABLE
C
LOGICAL*1 ISPEC3(8),ISPEC4(12)
DIMENSION IMXWD(10),RTWLTH(40),IRANSU(40),RWDENM(40),
1      DATAIN(256)
C
WRITE(7,800)
REWIND 7
800 FORMAT(/,1H ,'/BMCHA4.FOR/')
WRITE(7,990)
REWIND 7
990 FORMAT(/,1X,'REF #:',$,)
READ(7,90) IREFN
REWIND 7
90 FORMAT(I1)
WRITE(7,1000)
REWIND 7
1000 FORMAT(1H , 'REF WLTH:',$,)
READ(7,100) RRWLTH
REWIND 7
100 FORMAT(F5.1)
WRITE(7,999)
REWIND 7
999 FORMAT(1H , 'REF WDEN:',$,)
READ(7,99) IRWDEN
REWIND 7
99 FORMAT(I3)
11 WRITE(7,1001)
REWIND 7
1001 FORMAT(1H , 'RANGE,STEP OF TWLTH (F5.1,F5.1,F5.1)',$,)
READ(7,101) RRNGW1,RRNGW2,RSTEP
REWIND 7
101 FORMAT(2F5.1,F5.1)
WRITE(7,1002)
REWIND 7
1002 FORMAT(1H , 'D0,D1,D2 (MSEC) (F8.1)',$,)
READ(7,102) D0,D1,D2
REWIND 7
102 FORMAT(3F8.1)
WRITE(7,1007)
REWIND 7
1007 FORMAT(1H , 'SOA1,SOA2 (MSEC) (F8.1):',$,)
READ(7,107) SOA1,SOA2
REWIND 7

```

```

107 FORMAT(2F8.1)
WRITE(7,1003)
REWIND 7
1003 FORMAT(1H , 'TRIAL NUM IN BLOCK (I3) ', $)
READ (7,103) ITNUM
REWIND 7
103 FORMAT(I3)
WRITE(7,1006)
REWIND 7
1006 FORMAT(1H , 'RANDOM NO. ', $)
READ(7,104) IRDM
REWIND 7
104 FORMAT(I4)
C
DO 10 I=1,256
10 DATAIN(I)=0.
C
ITSTN=1-IREFN
IRWLTH=10.*RRWLTH
C
CALL SMOWG2(IREFN,IREFN,IRWLTH,IRWDEN)
C
ITWDEN=IRWDEN
INWLTH=(RRNGW2-RRNGW1)/RSTEP+1.
DO 70 I=1,INWLTH
70 RTWLTH(I)=RRNGW1+RSTEP*(FLOAT(I)-1.)
L=0
M=0
DO 69 I=1,IRDM
69 RDUMMY=RAN(L,M)
DO 71 II=1,INWLTH
72 IRANSU(II)=RAN(L,M)*FLOAT(INWLTH)+1.
DO 71 JJ=1,INWLTH
IF(JJ.EQ.II) GO TO 71
IF(IRANSU(II).EQ.IRANSU(JJ)) GO TO 72
71 CONTINUE
DO 60 I=1,INWLTH
J=IRANSU(I)
ITWLTH=RTWLTH(J)*10.
C
CALL SMOWG2(ITSTN,ITSTN,ITWLTH,ITWDEN)
C
RWDENS=0.
DO 50 K=1,ITNUM
C
31 CALL SSHMC1(D0,D1,D2,SOA1,SOA2)
C
CALL SWEDG2(ITSTN,IENDSG)
IF (IENDSG) 31,31,32
32 CALL SDSRD1(ITSTN,ITWDEN)
CALL SBELL2
CALL SBUZZ2
RWDENS=RWDENS+FLOAT(ITWDEN)

```

```
50 IMXWD(K)=ITWDEN
```

```
C
```

```
RWDENM(J)=RWDENS/FLOAT(ITNUM)
WRITE(7,1004) RTWLTH(J),(IMXWD(J1),J1=1,ITNUM)
REWIND 7
```

```
1004 FORMAT(1H , 'TEST WLTH=',F5.1,2X,10I5)
```

```
60 WRITE(7,1005) RWDENM(J)
```

```
REWIND 7
```

```
1005 FORMAT(6X, 'MEAN=',F5.1)
```

```
C
```

```
DATAIN(1)=RRNGW1
```

```
DATAIN(2)=RRNGW2
```

```
DATAIN(3)=RSTEP
```

```
DATAIN(4)=0.
```

```
DO 63 I=1,INWLTH
```

```
63 DATAIN(I+4)=RWDENM(I)
```

```
INWTH1=(INWLTH+4)/8+1
```

```
DO 64 I=1,INWTH1
```

```
I1=(I-1)*8
```

```
64 WRITE(7,1008) (DATAIN(I1+J),J=1,8)
```

```
REWIND 7
```

```
1008 FORMAT(8F7.1)
```

```
C
```

```
WRITE(7,111)
```

```
REWIND 7
```

```
111 FORMAT(1H , 'TYPE IN BLOK NO.:',S)
```

```
READ(7,112) IB
```

```
REWIND 7
```

```
112 FORMAT(I2)
```

```
ICHAN=IGETC()
```

```
IF(ICHAN.LT.0) STOP 'NO CHANNEL'
```

```
113 WRITE(7,444)
```

```
REWIND 7
```

```
444 FORMAT(1H , 'TYPE IN FILE SPEC.:',S)
```

```
READ(7,114) (ISPEC4(I),I=1,12)
```

```
REWIND 7
```

```
114 FORMAT(12A1)
```

```
CALL IRAD50(12,ISPEC4,ISPEC3)
```

```
IF(IENTER(ICHAN,ISPEC3,-1).LE.0) STOP 'ENTER FAILURE'
```

```
IF(IWRITE(256,DATAIN,IB,ICHAN).LE.0) STOP 'WRITE ERROR'
```

```
CALL CLOSEC(ICHAN)
```

```
CALL IFREEC(ICHAN)
```

```
STOP
```

```
END
```

手続Ⅱ

```

C
C   BRIGHTNESS MATCHING TYPE-B4 /BMCHB4.FOR/
C   DURATION AND SOA ARE ANY NO.5
C   #2 PATH IS AVAILABLE
C
      LOGICAL*1 ISPEC3(8),ISPEC4(12)
      DIMENSION IMXWD(10),REFWL(40),REFWS(40),IRANSU(40),RWDENM(40),
1      DATAOT(128),DATAIN(128)
C
      WRITE(7,800)
      REWIND 7
800  FORMAT(/,1H ,'/BMCHB4.FOR/')
      WRITE(7,990)
      REWIND 7
990  FORMAT(1X,'REF NO.:',S)
      READ(7,90) IREFN
      REWIND 7
90   FORMAT(I1)
      ITSTN=1-IREFN
C
      DO 5 I=1,128
5     DATAOT(I)=0.
      ICHAN=IGETC()
      IF(ICHAN.LT.0) STOP 'NO CHANNEL'
      WRITE(7,111)
      REWIND 7
111  FORMAT(1H , 'TYPE IN BLOCK NO.:',S)
      READ(7,140) IB
      REWIND 7
140  FORMAT(I2)
      WRITE (7,222)
      REWIND 7
222  FORMAT(1H , 'TYPE IN FILE SPEC.:',S)
      READ(7,223) (ISPEC4(I),I=1,12)
      REWIND 7
223  FORMAT(12A1)
      CALL IRAD50(12,ISPEC4,ISPEC3)
      IF(LOOKUP(ICCHAN,ISPEC3).LT.0) STOP 'BAD LOOKUP'
      IF(IREADW(256,DATAOT,IB,ICHAN).LE.0) STOP 'READ ERROR'
      CALL CLOSEC(ICCHAN)
      CALL IFREEC(ICCHAN)
C
      WRITE(7,1002)
      REWIND 7
1002 FORMAT(' D0,D1,D2 (MSEC) (F8.1):',S)
      READ(7,102) D0,D1,D2
      REWIND 7

```

```

102 FORMAT(3F8.1)
WRITE(7,1001)
REWIND 7
1001 FORMAT(' SOA1,SOA2 (MSEC) (F8.1):',S)
READ(7,101) SOA1,SOA2
REWIND 7
101 FORMAT(2F8.1)
WRITE(7,1003)
REWIND 7
1003 FORMAT(' TRIAL NUM IN BLOCK (I3)',S)
READ (7,103) ITNUM
REWIND 7
103 FORMAT(I3)
WRITE(7,1006)
REWIND 7
1006 FORMAT(' RANDOM NO.',S)
READ(7,104) IRDM
REWIND 7
104 FORMAT(I4)
C
INWLTH=(DATAOT(2)-DATAOT(1))/DATAOT(3)+1.
DO 70 I=1,INWLTH
REFWS(I)=DATAOT(I+4)
70 REFWL(I)=DATAOT(1)+DATAOT(3)*(FLOAT(I)-1.)
L=0
M=0
DO 69 I=1,IRDM
69 RDUMMY=RAN(L,M)
DO 71 II=1,INWLTH
72 IRANSU(II)=RAN(L,M)*FLOAT(INWLTH)+1.
DO 71 JJ=1,INWLTH
IF(JJ.EQ.II) GO TO 71
IF(IRANSU(II).EQ.IRANSU(JJ)) GO TO 72
71 CONTINUE
C
DO 60 I=1,INWLTH
J=IRANSU(I)
IREFWL=REFWL(J)*10.
IREFWS=REFWS(J)
PWS=(REFWS(J)-FLOAT(IREFWS))*2.-1.
IF(PWS) 10,11,11
11 IREFWS=IREFWS+1
GO TO 10
C
10 CALL SMOWG2(IREFN,IREFN,IREFWL,IREFWS)
C
ITSTWL=IREFWL
ITSTWS=IREFWS
C
CALL SMOWG2(ITSTN,ITSTN,ITSTWL,ITSTWS)
C
RWDENS=0.
DO 50 K=1,ITNUM
C

```

```

31 CALL SSHMC1(D0,D1,D2,SOA1,SOA2)
C
  CALL SWEDG2(ITSTN,IENDSG)
  IF (IENDSG) 31,31,32
32 CALL SBUZZ2
  CALL SBELL2
  CALL SDSRD1(ITSTN,ITWDEN)
  RWDENS=RWDENS+FLOAT(ITWDEN)
50 IMXWD(K)=ITWDEN
C
  RWDENM(J)=RWDENS/FLOAT(ITNUM)
  WRITE(7,1004) REFWL(J),(IMXWD(J1),J1=1,ITNUM)
  REWIND 7
1004 FORMAT(' TEST WLTH=',F5.1,2X,10I5)
  60 WRITE(7,1005) RWDENM(J)
  REWIND 7
1005 FORMAT(6X,'MEAN=',F5.1)
C
  DO 62 I=1,128
  62 DATAIN(I)=0.
  DATAIN(1)=DATAOT(1)
  DATAIN(2)=DATAOT(2)
  DATAIN(3)=DATAOT(3)
  DATAIN(4)=0.
  DO 63 I=1,INWLTH
  63 DATAIN(I+4)=RWDENM(I)
  INWTH1=(INWLTH+4)/8+1
  DO 64 I=1,INWTH1
  I1=(I-1)*8
  64 WRITE(7,1008) (DATAIN(I1+J),J=1,8)
  REWIND 7
1008 FORMAT(8F7.1)
C
  WRITE(7,113)
  REWIND 7
  113 FORMAT(/,IH,'TYPE IN BLOCK NO.:',S)
  READ(7,112) IB
  REWIND 7
  112 FORMAT(I2)
  ICHAN=IGETC()
  IF(ICHAN.LT.0) STOP 'NO CHANNEL'
  WRITE(7,444)
  REWIND 7
  444 FORMAT(' TYPE IN FILE SPEC.:',S)
  READ(7,445) (ISPEC4(I),I=1,12)
  REWIND 7
  445 FORMAT(12A1)
  CALL IRAD50(12,ISPEC4,ISPEC3)
  IF(IENTER(ICHAN,ISPEC3,-1).LE.0) STOP 'ENTER FAILURE'
  IF(IWRITW(256,DATAIN,IB,ICHAN).LE.0) STOP 'WRITE ERROR'
  CALL CLOSEC(ICHAN)
  CALL IFREEC(ICHAN)
C
  STOP
  END

```

プログラム (d) 実験 I のプログラム

```

C
C   WAVELENGTH DISCRIMINATION TYPE-D3 /WDSCD3.FOR/
C
  DIMENSION DWLTH(20),WDS0(128),WDS1(128),
1         ITDIFF(9),ITSAME(9),IDDIFF(20,9),IDSAME(20,9),
2         AWDS(2,128),AWDS1(2,810),ADATE(3)
C
  WRITE(7,998)
  REWIND 7
998  FORMAT(/,1H , '/WDSCD3.FOR/')
  WRITE(7,999)
  REWIND 7
999  FORMAT(/,1H , 'SUB(A2),SESS NO.(I2)',S)
  READ(7,99) SUB,NSESS
  REWIND 7
 99  FORMAT(A2,I2)
  WRITE(7,1000)
  REWIND 7
1000 FORMAT(1X,'D0,D1,D2 (MSEC) (F8.1):',S)
  READ(7,100) D0,D1,D2
  REWIND 7
 100 FORMAT(3F8.1)
  WRITE(7,1010)
  REWIND 7
1010 FORMAT(1X,'SOA1,SOA2 (MSEC) (F8.1):',S)
  READ(7,101) SOA1,SOA2
  REWIND 7
 101 FORMAT(2F8.1)
C
  ITSTNM=0
  WRITE(7,1020)
  REWIND 7
1020 FORMAT(1X,'TEST WLTH(F5.1):',S)
  READ(7,120) TWLTH
  REWIND 7
 120 FORMAT(F5.1)
  WRITE(7,1030)
  REWIND 7
1030 FORMAT(1X,'STEP WIDTH(F5.1):',S)
  READ(7,120) STEP
  REWIND 7
C
  WRITE(7,1040)
  REWIND 7
1040 FORMAT(1X,'NO. OF DUMMY WLTH(I2):',S)
  READ(7,140) INDMY
  REWIND 7

```

```

140 FORMAT(I2)
   WRITE(7,1050)
   REWIND 7
1050 FORMAT(IX,'DUMMY WLTH(F5.1):',S)
   READ(7,130) (DWLTH(I),I=1,INDMY)
   REWIND 7
130 FORMAT(20F5.1)
C
   WRITE(7,1055)
   REWIND 7
1055 FORMAT(IX,'SHIFT OF COMP.(F5.1):',S)
   READ(7,120) SHFT
   REWIND 7
C
   WRITE(7,1080)
   REWIND 7
1080 FORMAT(IX,'NO. OF TEST(I3):',S)
   READ(7,170) INTST
   REWIND 7
170 FORMAT(I3)
   WRITE(7,1060)
   REWIND 7
1060 FORMAT(IX,'RATIO(F4.1) OF TEST:DUMMY=1:',S)
   READ(7,150) RATIO
   REWIND 7
150 FORMAT(F4.1)
   WRITE(7,1070)
   REWIND 7
1070 FORMAT(IX,'RANDOM NO.(I4):',S)
   READ(7,160) IRNDM
   REWIND 7
160 FORMAT(I4)
C
C   READ WEDGE DENSITY SCALE FROM FILE
C
   WRITE(7,1090)
   REWIND 7
1090 FORMAT(IX,'READ #0 WDS FROM FILE')
   CALL RDFILE(WDS0)
   WRITE(7,1095)
   REWIND 7
1095 FORMAT(IX,'READ #1 WDS FROM FILE')
   CALL RDFILE(WDS1)
C
   DO 10 J=1,128
   AWDS(1,J)=WDS0(J)
10 AWDS(2,J)=WDS1(J)
C
   INSTEP=STEP/0.1
C
   DO 91 II=1,2
   RLWLMT=TWLTH-40.0
   IF(RLWLMT .GE. AWDS(II,1)) GO TO 74
   RLWLMT=AWDS(II,1)

```

```

74 UPLMT=TWLTH+40.0
   IF(UPLMT .LE. AWDS(II,2)) GO TO 75
   UPLMT=AWDS(II,2)
75 IAPDX1=TWLTH/10.0
   RAPDX2=TWLTH/10.0-FLOAT(IAPDX1)
   IF(RAPDX2.NE.0.) STOP 'BAD TWLTH'

```

C

```

   IORLW=(RLWLMT-AWDS(II,1))/AWDS(II,3)+5.
   IORUP=(UPLMT-AWDS(II,1))/AWDS(II,3)+5.
   K=0
   DO 90 I=IORLW,IORUP-1
   DO 90 J=1,100
   K=K+1
90 AWDS1(II,K+4)=(AWDS(II,I+1)-AWDS(II,I))/100.
   I
   *FLOAT(J-1)+AWDS(II,I)
   AWDS1(II,K+5)=AWDS(II,IORUP)
   AWDS1(II,1)=RLWLMT
   AWDS1(II,2)=UPLMT
   AWDS1(II,3)=0.1
91 AWDS1(II,4)=0.0

```

C

```

   L=0
   M=0
   DO 20 I=1,IRNDM
20 RDUMMY=RAN(L,M)
   DO 65 I=1,9
   ITDIFF(I)=0
   ITSAME(I)=0
   DO 65 J=1,20
   IDDIFF(J,I)=0
65 IDSAME(J,I)=0
   RATIO1=1./(1.+RATIO)

```

C

```

60 IF(RAN(L,M).LT.RATIO1) GO TO 30
   IDYMXN=RAN(L,M)*FLOAT(INDMY)+1.
   ILAMB=DWLTH(IDYMXN)*10.
   GO TO 31
30 ILAMB=TWLTH*10.
   IDYMXN=0
31 INUM=ITSTNM
   II=1

```

C

```

   RLAMB=FLOAT(ILAMB)/10.
   IWDSN=(RLAMB-AWDS1(II,1))/0.1+1.
   IWDSN4=IWDSN+4
   IRWDS=AWDS1(II,IWDSN4)
   PWDS=(AWDS1(II,IWDSN4)-FLOAT(IRWDS))*2.-1.
   IF(PWDS) 33,32,32
32 IDEN=IRWDS+1
   GO TO 34
33 IDEN=IRWDS

```

C

```

34 CALL SMOWG2(INUM,INUM,ILAMB,IDEN)

```

```

C
  II=2
38 ICOMN=INT(RAN(L,M)*9.)-4
   ICOMN1=ICOMN+5
   IF(IDYMXN.NE.0) GO TO 39
   IXTST=ITDIFF(ICOMN1)+ITSAME(ICOMN1)
   IF(IXTST.GE.INTST) GO TO 38
39 CWLTH=RLAMB+SHFT+STEP*FLOAT(ICOMN)
   IF(CWLTH.LT.AWDS1(II,1)) GO TO 38
   IF(CWLTH.GT.AWDS1(II,2)) GO TO 38
   ILAMB=CWLTH*10.
   IIWDSN=(RLAMB+SHFT-AWDS1(II,1))/0.1+1.
   ICWDSN=IIWDSN+ICOMN*INSTEP
   ICWSN4=ICWDSN+4
   IRWDS=AWDS1(II,ICWSN4)
   PWDS=(AWDS1(II,ICWSN4)-FLOAT(IRWDS))*2.-1.
   IF(PWDS) 35,36,36
36 IDEN=IRWDS+1
   GO TO 37
35 IDEN=IRWDS
37 INUM=1-ITSTNM

C
  CALL SMOGW2(INUM,INUM,ILAMB,IDEN)

C
  CALL SBELL2

C
  CALL SBUZZ2

C
  CALL SSHMC1(D0,D1,D2,SOA1,SOA2)

C
  CALL SRESP1(IRDIFF,IRSAME)
  IF((IRDIFF+IRSAME).NE.1) GO TO 60
  IF(IDYMXN.EQ.0) GO TO 40
  IDDIFF(IDYMXN,ICOMN1)=IDDIFF(IDYMXN,ICOMN1)+IRDIFF
  IDSAME(IDYMXN,ICOMN1)=IDSAME(IDYMXN,ICOMN1)+IRSAME
  GO TO 50
40 ITDIFF(ICOMN1)=ITDIFF(ICOMN1)+IRDIFF
  ITSAME(ICOMN1)=ITSAME(ICOMN1)+IRSAME
50 ITOTAL=0
  DO 51 I=1,9
51 ITOTAL=ITOTAL+ITDIFF(I)+ITSAME(I)
  ITNTST=9*INTST
  IF(ITOTAL.LT.ITNTST) GO TO 60

C
  DO 52 I=1,3
52 ADATE(I)=0.
  CALL DATE(ADATE)

C
  WRITE(7,1100) TWLTH,STEP,SHFT,SUB,NSESS,(ADATE(I),I=1,3)
  REWIND 7
1100 FORMAT(/,1X,'TEST WLTH:',F5.1,3X,'STEP:',F5.1,3X,
1'SHIFT:',F5.1,6X,A2,I2,2X,3A4)
  WRITE(7,1105) D0,D1,D2

```

```

REWIND 7
1105 FORMAT(1X,'D0=',F8.1,5X,'D1=',F8.1,5X,'D2=',F8.1)
WRITE(7,1106) SOA1,SOA2
REWIND 7
1106 FORMAT(1X,'SOA1=',F8.1,5X,'SOA2=',F8.1)
WRITE(7,1110)
REWIND 7
1110 FORMAT(1X,'COMP WLTH',3X,'DIFF    SAME    TOTAL    %DIFF')
DO 70 I=1,9
  OTWLTH=TWLTH+SHFT+STEP*FLOAT(I-5)
  INTAL=ITDIFF(I)+ITSAME(I)
  IF(INTAL.NE.0) GO TO 71
  PERDIF=0.
  GO TO 72
71 PERDIF=FLOAT(ITDIFF(I))/FLOAT(INTAL)*100.
72 WRITE(7,1120)  OTWLTH,ITDIFF(I),ITSAME(I),INTAL,PERDIF
REWIND 7
1120 FORMAT(3X,F5.1,2X,I6,I7,3X,I5,5X,F7.2)
70 CONTINUE
DO 80 I=1,INDMY
  WRITE(7,1130)  I,DWLTH(I),STEP,SHFT,SUB,NSESS,(ADATE(I),I=1,3)
REWIND 7
1130 FORMAT(//,1X,'DUM',I1,' WLTH:',F5.1,
1      3X,'STEP:',F5.1,3X,'SHIFT:',F5.1,6X,A2,I2,2X,3A4)
WRITE(7,1110)
REWIND 7
DO 80 J=1,9
  OTWLTH=DWLTH(I)+SHFT+STEP*FLOAT(J-5)
  INTAL=IDDIFF(I,J)+IDSAME(I,J)
  IF(INTAL.NE.0) GO TO 81
  PERDIF=0.
  GO TO 82
81 PERDIF=FLOAT(IDDIFF(I,J))/FLOAT(INTAL)*100.
82 WRITE(7,1120)  OTWLTH,IDDIFF(I,J),IDSAME(I,J),INTAL,PERDIF
REWIND 7
80 CONTINUE
C
STOP
END

```

プログラム (e) 実験Ⅱのプログラム

```

C
C
C
C
WAVELENGTH DISCRIMINATION UP-DOWN METHOD 3
/WDUD3.FOR/

COMMON SWLTH(61),IDMSP(10),RATIO(10),AWDS(2,128),
1     ISWDS(2,61),IRP0(2,120),
2     IISTM(2,120),IICMPN(2,120),IICMPT(2,120),
3     SUB,NSESS,NTCH,NCCH,IDUR,ISOA,STPWD,NDUM,
4     NTAL,ICMPI(2),IDIRI(2),IRAN,NTCH1,NCCH1,NPS(2),
5     NDATA0(2),NTPS(2)

C
CALL INUD3
CALL CMUD3
CALL PRUD3
CALL OTUD3

C
STOP
END

```

サブルーチン INUD3

```

C
C
C
C
SUBROUTINE INPUT DATA FOR UP-DOWN METHOD 3
/INUD3.FOR/

SUBROUTINE INUD3

C
COMMON SWLTH(61),IDMSP(10),RATIO(10),AWDS(2,128),
1     ISWDS(2,61),IRP0(2,120),
2     IISTM(2,120),IICMPN(2,120),IICMPT(2,120),
3     SUB,NSESS,NTCH,NCCH,IDUR,ISOA,STPWD,NDUM,
4     NTAL,ICMPI(2),IDIRI(2),IRAN,NTCH1,NCCH1,NPS(2),
5     NDATA0(2),NTPS(2)

C
DIMENSION WDS(128)

C
TYPE 1000
1000 FORMAT(1X,'SUBJECT(A2),SESSION NO.(12):',5)
ACCEPT 100,SUB,NSESS
100 FORMAT(A2,12)
NTCH=0
NCCH=1-NTCH
TYPE 1010

```

```

1010 FORMAT(1H+, 'DURATION, SOA(I5):', $)
ACCEPT 101, IDUR, ISOA
101 FORMAT(2I5)
TYPE 1020
1020 FORMAT(1H+, 'TEST WLTH, STEP WIDTH(F5.1):', $)
ACCEPT 102, SWLTH(31), STPWD
102 FORMAT(2F5.1)
TYPE 1030
1030 FORMAT(1H+, 'NO. OF DUMMY WLTH(I2):', $)
ACCEPT 103, NDUM
103 FORMAT(I2)
IF(NDUM.EQ.0) GO TO 30
TYPE 1040
1040 FORMAT(1H+, 'DUMMY STEP NO.S(I3):', $)
ACCEPT 104, (IDMSP(I), I=1, NDUM)
104 FORMAT(10I3)
30 TYPE 1050
1050 FORMAT(1H+, 'NO. OF TOTAL TEST PRESENTATION(I3):', $)
ACCEPT 105, NTAL
105 FORMAT(I3)
IF(NDUM.EQ.0) GO TO 31
TYPE 1060, (I, I=1, NDUM)
1060 FORMAT(1H+, 'RATIO OF TEST(1): DUMMY', 10I3)
TYPE 1061
1061 FORMAT(1H, '(F4.1)=' , $)
ACCEPT 106, (RATIO(I), I=1, NDUM)
106 FORMAT(10F4.1)
31 TYPE 1070
1070 FORMAT(1H+, 'INITIAL COMP. POSITIONS (I3):', $)
ACCEPT 107, (ICMPI(I), I=1, 2)
107 FORMAT(2I3)
DO 32 I=1, 2
IDIRI(I)=1
IF(ICMPI(I).GE.0) IDIRI(I)=-1
32 CONTINUE
TYPE 1080
1080 FORMAT(1H+, 'RANDOM NO.(I4):', $)
ACCEPT 108, IRAN
108 FORMAT(I4)
C
C READ WEDGE DENSITY SCALE FROM FILE
C
TYPE 1090
1090 FORMAT(1H+, 'READ #0 WDS FROM FILE')
CALL RDFILE(WDS)
DO 10 J=1, 128
10 AWDS(1, J)=WDS(J)
TYPE 1095
1095 FORMAT(1H+, 'READ #1 WDS FROM FILE')
CALL RDFILE(WDS)
DO 20 J=1, 128
20 AWDS(2, J)=WDS(J)
C
RETURN
END

```

#7"IL-7" CMUD3

```

C
C   SUBROUTINE COMPUTE DATA & MAKE TABLES FOR UP-DOWN METHOD 3
C   /CMUD3.FOR/
C
C   SUBROUTINE CMUD3
C
COMMON SWLTH(61),IDMSP(10),RATIO(10),AWDS(2,128),
1     ISWDS(2,61),IRP0(2,120),
2     IISTM(2,120),IICMPN(2,120),IICMPT(2,120),
3     SUB,NSESS,NTCH,NCCH,IDUR,ISOA,STPWD,NDUM,
4     NTAL,ICMPI(2),IDIRI(2),IRAN,NTCH1,NCCH1,NPS(2),
5     NDATA0(2),NTPS(2)
C
NTCH1=NTCH+1
NCCH1=NCCH+1
C
C   COMPUTE STIMULUS WAVELENGTHS
C
DO 10 I=1,61
II=I-31
SWLTH(I)=SWLTH(31)+STPWD*FLOAT(II)
IF(SWLTH(I).LT.AWDS(NCCH1,1)) GO TO 11
IF(SWLTH(I).GT.AWDS(NCCH1,2)) GO TO 12
GO TO 10
11 SWLTH(I)=AWDS(NCCH1,1)
GO TO 10
12 SWLTH(I)=AWDS(NCCH1,2)
10 CONTINUE
C
C   COMPUTE STIMULUS WEDGE DENSITY SCALE
C
DO 20 J=1,2
DO 20 I=1,61
RDIF=(SWLTH(I)-AWDS(J,1))/AWDS(J,3)
IOR1=RDIF+5.
IOR2=IOR1+1
IF(SWLTH(I).EQ.AWDS(J,2)) GO TO 21
BWDS=(AWDS(J,IOR2)-AWDS(J,IOR1))*(RDIF-FLOAT(IOR1-5))
1   +AWDS(J,IOR1)
GO TO 24
21 BWDS=AWDS(J,IOR1)
24 IBWDS=BWDS
PWDS=(BWDS-FLOAT(IBWDS))*2.-1.
IF(PWDS) 22,23,23
23 ISWDS(J,I)=IBWDS+1
GO TO 20
22 ISWDS(J,I)=IBWDS
20 CONTINUE
C
RETURN
END

```

サブルーチン PRUD3

```

C
C SUBROUTINE PRESENT STIMULI FOR UP-DOWN METHOD 3
C /PRUD3.FOR/
C
C SUBROUTINE PRUD3
C
COMMON SWLTH(61),IDMSP(10),RATIO(10),AWDS(2,128),
1 ISWDS(2,61),IRP0(2,120),
2 IISTM(2,120),IICMPN(2,120),IICMPT(2,120),
3 SUB,NSESS,NTCH,NCCH,IDUR,ISOA,STPWD,NDUM,
4 NTAL,ICMPI(2),IDIRI(2),IRAN,NTCH1,NCCH1,NPS(2),
5 NDATA0(2),NTPS(2)
C
L=0
M=0
DO 10 I=1,IRAN
10 RANDM=RAN(L,M)
C
IF(NDUM.EQ.0) GO TO 12
TDRA=0.
DO 20 I=1,NDUM
20 TDRA=RATIO(I)+TDRA
RTEST=1./(1.+TDRA)
DO 32 I=1,NDUM
32 RATIO(I)=RATIO(I)/TDRA
DRATB=0.
DO 33 I=1,NDUM
DRATB=RATIO(I)+DRATB
33 RATIO(I)=DRATB
C
12 DO 100 IJK=1,2
DO 11 I=1,120
IRP0(IJK,I)=0
IISTM(IJK,I)=0
11 IICMPN(IJK,I)=0
NPRES=0
NTPRES=0
NDATA0(IJK)=-4
J1=-7
NTPR2=0
NDPR2=0
ITRP0=0
ICMP=ICMPI(IJK)
IDIR=IDIRI(IJK)
ICMPD=ICMPI(IJK)
J=0
C
60 IF(NDUM.EQ.0) GO TO 63
IF(RAN(L,M).GE.RTEST) GO TO 30
IF(NTPR2.GE.2) GO TO 31
63 INDTD=0

```

```

    I STM=31
    I CMPN=I STM+I CMP
    GO TO 50
30 IF(NDPR2.GE.2) GO TO 63
31 INDTD=1
    RANDM=RAN(L,M)
    DO 40 I=1,NDUM
    IF(RANDM.LT.RATIO(I)) GO TO 41
40 CONTINUE
41 I STM=IDMSP(I)
    I CMPN=I STM+I CMPD
50 ILAMB=SWLTH(I STM)*10.
    IDEN=I SWDS(NTCH1,I STM)
C
    CALL SMOVG3(NTCH,NTCH,ILAMB,IDEN)
C
    ILAMB=SWLTH(I CMPN)*10.
    IDEN=I SWDS(NCCH1,I CMPN)
C
    CALL SMOVG3(NCCH,NCCH,ILAMB,IDEN)
C
    CALL SBELL1
C
    CALL SSHGO
C
    IF(ISOA-IDUR) 2,3,4
2 IF(ISOA) 5,5,6
6 IT01=IDUR-ISOA
    CALL SSH3A0(ISOA,IT01,ISOA)
    GO TO 9
5 CALL SSH1(IDUR)
    GO TO 9
3 CALL SSH20(IDUR,IDUR)
    GO TO 9
4 IT01=ISOA-IDUR
    CALL SSH3B0(IDUR,IT01,IDUR)
C
9 CALL SSHGC
C
    CALL SRESP1(IR0,IR1)
C
    IF((IR0+IR1).NE.1) GO TO 60
    NPRES=NPRES+1
    I I STM(IJK,NPRES)=I STM
    I I CMPN(IJK,NPRES)=I CMPN
    I RP0(IJK,NPRES)=IR0
C
    IF(INDTD.EQ.1) GO TO 64
    NTPR2=NTPR2+1
    NDPR2=0
    NTPRES=NTPRES+1
    I I CMPT(IJK,NTPRES)=I CMP

```

```

IF(NTPRES.EQ.1) GO TO 66
IF(IR0.EQ.ITRP0) GO TO 62
IDIR=-1*IDIR
J=J+1
J1=0
IF(J.EQ.1) NDATA0(IJK)=NTPRES
GO TO 62
66 IF(IR0.EQ.0) IDIR=-1*IDIR
62 ICMP=ICMP+IDIR
ITRP0=IR0
J1=J1+1
IF(J1.GE.8) STOP 'TOO MANY SAME RESP.S'
GO TO 65
64 NDPR2=NDPR2+1
NTPR2=0
IRANDM=RAN(L,M)*7.-3.
ICMPD=IRANDM+ICMP
65 NITPRS=NTPRES-NDATA0(IJK)+1
IF(NITPRS.LT.NTAL) GO TO 60
NPS(IJK)=NPRES
NTPS(IJK)=NTPRES
C
61 IF(J.EQ.0) STOP 'NO. OF RESP CHANGE=0'
DO 102 I=1,3
102 CALL SBELL1
IF(IJK.NE.1) GO TO 100
TYPE 200
200 FORMAT(1H+, 'CONTINUE:',S)
ACCEPT 70,ICONTI
70 FORMAT(I1)
IF(ICONTI.EQ.0) GO TO 101
100 CONTINUE
C
101 RETURN
END

```

サブルーチン OTUD3

```

C
C SUBROUTINE OUTPUT DATA FOR UP-DOWN METHOD 3
C /OTUD3.FOR/
C
C SUBROUTINE OTUD3
C
COMMON SWLTH(61),IDMSP(10),RATIO(10),AWDS(2,128),
1 ISWDS(2,61),IRP0(2,120),
2 IISTM(2,120),IICMPN(2,120),IICMPT(2,120),
3 SUB,NSESS,NTCH,NCCH,1DUR,ISOA,STPWD,NDUM,
4 NTAL,ICMPI(2),IDIRI(2),IRAN,NTCH1,NCCH1,NPS(2),
5 NDATA0(2),NTPS(2)
C
DIMENSION ADATE(3),DMWLTH(10),STAR(2),KAKKO(2)
C
DATA STAR/1H*,1H /,KAKKO/1H(,1H)/

```

```

C
  DO 10 I=1,3
10  ADATE(I)=0.
    CALL DATE(ADATE)
C
  TYPE 1000,SWLTH(31),IDUR,ISOA,SUB,NSESS,(ADATE(I),I=1,3)
1000 FORMAT(/,IX,'TEST WLTH:',F5.1,3X,'DURATION:',I4,3X,'SOA:',I4,
1      5X,A2,'-',I2,3X,3A4)
    IF(NDUM.EQ.0) GO TO 21
    DO 20 I=1,NDUM
      J=IDMSP(I)
    20  DMWLTH(I)=SWLTH(J)
      TYPE 1200,STPWD,(DMWLTH(I),KAKKO(1),IDMSP(I),KAKKO(2),I=1,NDUM)
1200  FORMAT(IX,'STEP WIDTH:',F4.1,3X,'DUMMY WLTH:',10(F7.1,A1,I2,A1
      GO TO 22
    21  TYPE 1300,STPWD
1300  FORMAT(IX,'STEP WIDTH:',F4.1)
C
  22  DO 100 IJK=1,2
      TNDLB=0.
      TNDL2B=0.
      IDATA=0
      NTPRES=NTPS(IJK)
      NDAT0=NDATA0(IJK)
      DO 40 I=NDAT0,NTPRES
        IDATA=IDATA+1
        TNDLB=TNDLB+FLOAT(IICMPT(IJK,I))
    40  TNDL2B=TNDL2B+FLOAT(IICMPT(IJK,I))**2
        DLSTPB=TNDLB/FLOAT(IDATA)
        IF(IDATA.EQ.1) GO TO 41
        SDSTPB=((TNDL2B-(TNDLB**2)/FLOAT(IDATA))/FLOAT(IDATA-1))
1      **0.5
      GO TO 42
    41  SDSTP=0.
    42  DLWTHB=DLSTPB*STPWD
      SDWTHB=SDSTPB*STPWD
C
  TYPE 1302,IDATA,DLWTHB,SDWTHB
1302  FORMAT(IX,'NO.OF DATA=',I3,5X,'DL=',F7.3,5X,'SD=',F7.3)
100  CONTINUE
C
  TYPE 1500
1500  FORMAT(/,IX,2('NO.',IX,'TST',IX,'CMP',
1      2X,'DIF',IX,'RP',3X))
      NPRES=NPS(2)
      IF(NPS(1).GE.NPS(2)) NPRES=NPS(1)
      DO 30 I=1,NPRES
        PSTAR1=STAR(2)
        PSTAR2=STAR(2)
        IF(IISTM(1,I).EQ.31) PSTAR1=STAR(1)
        IF(IISTM(2,I).EQ.31) PSTAR2=STAR(1)
        IICMP1=IICMPN(1,I)-IISTM(1,I)
        IICMP2=IICMPN(2,I)-IISTM(2,I)
    30  TYPE 1600,I,IISTM(1,I),IICMPN(1,I),IICMP1,IRP0(1,I),PSTAR1,
1      I,IISTM(2,I),IICMPN(2,I),IICMP2,IRP0(2,I),PSTAR2
1600  FORMAT(IX,I3,2I4,2X,I3,I2,A1,3X,I3,2I4,2X,I3,I2,A1)
C
  RETURN
  END

```

サブルーチン RDFILE

```
C
C
C SUBROUTINE READ DATA FROM FILE /RDFILE.FOR/
C
C SUBROUTINE RDFILE(DATAOT)
C
C LOGICAL*1 ISPEC3(8),ISPEC4(12)
C DIMENSION DATAOT(128)
C
C DO 5 I=1,128
5 DATAOT(I)=0.
  ICHAN=IGETC()
  IF(ICHAN.LT.0) STOP 'NO CHANNEL'
  WRITE(7,111)
  REWIND 7
111 FORMAT(1H , 'TYPE IN BLOCK NO.: ',5)
  READ(7,140) IB
  REWIND 7
140 FORMAT(I2)
  WRITE(7,222)
  REWIND 7
222 FORMAT(1H , 'TYPE IN FILE SPEC.: ',5)
  READ(7,223) (ISPEC4(I),I=1,12)
  REWIND 7
223 FORMAT(12A1)
  CALL IRAD50(12,ISPEC4,ISPEC3)
  IF(LOOKUP(ICHAN,ISPEC3).LT.0) STOP 'NO FILE'
  IF(IREADW(256,DATAOT,IB,ICHAN).LE.0) STOP 'READ ERROR'
  CALL CLOSEC(ICHAN)
  CALL IFREEC(ICHAN)
C
C RETURN
C END
```

```
          サブルーチン SRESP1
; SUBROUTINE /SRESP1/
          .MCALL ..V2...REGDEF
          ..V2..
          .REGDEF
          .GLOBL SRESP1
SRESP1: CLR R1
          CLR R2
          MOV #2,R3
LOOP:    MOV #26020,R4
INSWCH: MOV @INBUF3,R0
          BIC #177774,R0
          CMP #3,R0
          BEQ REFUSE
          BIT #1,R0
          BNE YES
          BIT #2,R0
          BNE NO
          BR COUNT
REFUSE:  MOV #1,R1
          MOV #1,R2
          BR COUNT
YES:     MOV #1,R1
          BR COUNT
NO:      MOV #1,R2
COUNT:  DEC R4
          BNE INSWCH
          DEC R3
          BNE LOOP
RETURN:  MOV R5,R0
          ADD #2,R5
          MOV R1,@(R5)+
          MOV R2,@(R5)+
          MOV R0,R5
          RTS PC
INBUF3:  167754
          .END
```

```

    ﾀｸﾞｲﾙｰﾁﾝ  SBELL1
; SUBROUTINE /SBELL1/
    .MCALL ..V2...REGDEF
    ..V2..
    .REGDEF
    .GLOBL SBELL1
SBELL1: TSTB @TTCSR
    BPL SBELL1
    MOVB #7,@TTOTBF
    MOV #5,R0
LOOP2: MOV #26020,R1
LOOP1: DEC R1
    BNE LOOP1
    DEC R0
    BNE LOOP2
    RTS PC
TTOTBF: 176506
TTCSR:  176504
    .END

```

```

    ﾀｸﾞｲﾙｰﾁﾝ  SBELL2
; SUBROUTINE /SBELL2/
    .MCALL ..V2...REGDEF
    ..V2..
    .REGDEF
    .GLOBL SBELL2
SBELL2: TSTB @TTCSR
    BPL SBELL2
    MOVB #7,@TTOTBF
    MOV #5,R0
LOOP2: MOV #26020,R1
LOOP1: DEC R1
    BNE LOOP1
    DEC R0
    BNE LOOP2
    RTS PC
TTOTBF: 177566
TTCSR:  177564
    .END

```

```

    ﾀｸﾞｲﾙｰﾁﾝ  SBELL3
; SUBROUTINE /SBELL3/
    .TITLE SBELL3
    .MCALL ..V2...REGDEF
    ..V2..
    .REGDEF
    .GLOBL SBELL3
SBELL3: TSTB @TTCSR
    BPL SBELL3
    MOVB #7,@TTOTBF
    RTS PC
TTOTBF: 177566
TTCSR:  177564
    .END

```

```
サブルーチン SBUZZ2
;
; SUBROUTINE /SBUZZ2.MAC/
    .MCALL ..V2...REGDEF
    ..V2..
    .REGDEF
    .GLOBL SBUZZ2
SBUZZ2: MOV #50.,R1
        MOV #10.,R0
        NEG R0
        MOV R0,@KWBPR
LP3:    MOV #10,@OTBF3
        MOV #31,@KWCSR
LP1:    BIT #200,@KWCSR
        BEQ LP1
        CLR @KWCSR
        CLR @OTBF3
        MOV #31,@KWCSR
LP2:    BIT #200,@KWCSR
        BEQ LP2
        CLR @KWCSR
        DEC R1
        BNE LP3
        MOV #500.,R0
        NEG R0
        MOV R0,@KWBPR
        MOV #41,@KWCSR
LP4:    BIT #200,@KWCSR
        BEQ LP4
        CLR @KWCSR
        RTS PC
KWCSR: 170420
KWBPR: 170422
OTBF3: 167752
.END
```

†† フォルテン SDSRD1

; SUBROUTINE /SDSRD1/ WEDGE DENSITY SCALE READ
;

```
.MCALL ..V2...REGDEF
..V2..
.REGDEF
.GLOBL SDSRD1
SDSRD1: MOV R5,R4
      ADD #2,R4
      TST @(R4)+
      BNE WNUM1
WNUM0: MOV #0,@CSR2
      BR INSB CD
WNUM1: MOV #3,@CSR2
INSB CD: MOV @INBUF2,R0
      COM R0
      BIC #176000,R0
      CLR R2
      MOV #MULNUM,R3
BINARY: MOV R0,R1
      CLR R0
      DIV #16.,R0
      MUL (R3)+,R1
      ADD R1,R2
      TST (R3)
      BNE BINARY
      MOV R2,@(R4)+
      RTS PC
CSR2: 167760
INBUF2: 167764
MULNUM: .WORD 1,10.,100.,0
.END
```

```

#71L-72 SWEDG2
;SUBROUTINE /SWEDG2/
    .MCALL ..V2...REGDEF
    ..V2..
    .REGDEF
    .GLOBL SWEDG2
SWEDG2: MOV R5,R4
        ADD #2,R5
        MOV @(R5)+,R0
        TST R0
        BNE NUM1
NUM0:   MOV #0,@CSR2
        BR TIMELP
NUM1:   MOV #3,@CSR2
TIMELP: MOV #3,R1
LOOP1:  MOV #26020,R2
INSWCH: MOV @INBUF3,R0
        BIT #1,R0
        BNE DOWNSL
        BIT #2,R0
        BNE UPSL
        CLR @OTBUF2
        BIT #10,R0
        BNE EDSG
        BR COUNT
DOWNSL: MOV #6,@OTBUF2
        BR COUNT
UPSL:   MOV #5,@OTBUF2
COUNT: DEC R2
        BNE INSWCH
        DEC R1
        BNE LOOP1
        CLR @OTBUF2
        MOV #0,@(R5)+
        BR RETURN
EDSG:   MOV #1,@(R5)+
        MOV #10.,R1
LOOP2:  MOV #26020,R2
COUNT1: DEC R2
        BNE COUNT1
        DEC R1
        BNE LOOP2
RETURN: MOV R4,R5
        RTS PC
CSR2:   167760
OTBUF2: 167762
INBUF2: 167764
INBUF3: 167754
        .END

```


77"ルーチン SSH1

;SUBROUTINE /SSH1/ SHUTTER CONTROL MODE-1
;

```

    .MCALL ..V2...REGDEF
    ..V2..
    .REGDEF
    .GLOBL SSH1,LDRTN
SSH1: CLR @OTBUF3
      MOV #4,@OTBUF3
      ADD #2,R5
      MOV #7,@OTBUF3
      MOV @(R5)+,R4
      JSR PC,LDRTN
      MOV #4,@OTBUF3
      RTS PC
OTBUF3: 167752
    .END

```

77"ルーチン SSH20

;SUBROUTINE /SSH20/ SHUTTER CONTROL MODE-20
;

```

    .MCALL ..V2...REGDEF
    ..V2..
    .REGDEF
    .GLOBL SSH20,LDRTN
SSH20: CLR @OTBUF3
      MOV #4,@OTBUF3
      ADD #2,R5
      MOV #5,@OTBUF3
      MOV @(R5)+,R4
      JSR PC,LDRTN
      MOV #6,@OTBUF3
      MOV @(R5)+,R4
      JSR PC,LDRTN
      MOV #4,@OTBUF3
      RTS PC
OTBUF3: 167752
    .END

```

```

サテライト SSH3A0
; SUBROUTINE /SSH3A0/ SHUTTER CONTROL MODE-3A0
;
    .MCALL ..V2... .REGDEF
    ..V2..
    .REGDEF
    .GLOBL SSH3A0, LDRTN
SSH3A0:    CLR @OTBUF3
    MOV #4, @OTBUF3
    ADD #2, R5
    MOV #5, @OTBUF3
    MOV @(R5)+, R4
    JSR PC, LDRTN
    MOV #7, @OTBUF3
    MOV @(R5)+, R4
    JSR PC, LDRTN
    MOV #6, @OTBUF3
    MOV @(R5)+, R4
    JSR PC, LDRTN
    MOV #4, @OTBUF3
    RTS PC
OTBUF3: 167752
    .END

```

```

サテライト SSH3B0
; SUBROUTINE /SSH3B0/ SHUTTER CONTROL MODE-3B0
;
    .MCALL ..V2... .REGDEF
    ..V2..
    .REGDEF
    .GLOBL SSH3B0, LDRTN
SSH3B0:    CLR @OTBUF3
    MOV #4, @OTBUF3
    ADD #2, R5
    MOV #5, @OTBUF3
    MOV @(R5)+, R4
    JSR PC, LDRTN
    MOV #4, @OTBUF3
    MOV @(R5)+, R4
    JSR PC, LDRTN
    MOV #6, @OTBUF3
    MOV @(R5)+, R4
    JSR PC, LDRTN
    MOV #4, @OTBUF3
    RTS PC
OTBUF3: 167752
    .END

```

付録Ⅳ 累積正規分布曲線のあてはめ方

実験Ⅰの測定点に最小二乗法であてはめた、2本の累積正規分布曲線の求め方を以下に述べる。

$$P_e(\lambda) = \frac{1}{\sigma_e \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lambda} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(t - \mu_e)^2}{\sigma_e^2}\right\} dt$$

$$P_s(\lambda) = 1 - \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\lambda} \exp\left\{-\frac{1}{2} \frac{(t - \mu_s)^2}{\sigma_s^2}\right\} dt$$

として、

$$P(\lambda) = P_e(\lambda) + P_s(\lambda)$$

を9個の測定点 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_9$ に対応する9個の測定値 Q_1, Q_2, \dots, Q_9 にあてはめる。

$$Y_e = \frac{\lambda - \mu_e}{\sigma_e} = -\frac{\mu_e}{\sigma_e} + \frac{1}{\sigma_e} \lambda = \alpha_e + \beta_e \lambda$$

とおくと、

$$P_e(\lambda) = \int_{-\infty}^{Y_e} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} T^2\right) dT$$

となり、

$$\frac{\partial P_e}{\partial Y_e} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} Y_e^2} = Z_e$$

として、

$$\frac{\partial P_e}{\partial \alpha_e} = \frac{\partial P_e}{\partial Y_e} \frac{\partial Y_e}{\partial \alpha_e} = Z_e, \quad \frac{\partial P_e}{\partial \beta_e} = \frac{\partial P_e}{\partial Y_e} \frac{\partial Y_e}{\partial \beta_e} = Z_e \cdot \lambda$$

となる。同様にして

$$Y_s = \frac{\lambda - \mu_s}{\sigma_s} = -\frac{\mu_s}{\sigma_s} + \frac{1}{\sigma_s} \lambda = \alpha_s + \beta_s \lambda$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial Y_s} = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}Y_s^2} = -Z_s$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial \alpha_s} = -Z_s, \quad \frac{\partial P_s}{\partial \beta_s} = -Z_s \cdot \lambda$$

となる。したがって

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha_l} = Z_l, \quad \frac{\partial P}{\partial \alpha_s} = -Z_s$$

$$\frac{\partial P}{\partial \beta_l} = Z_l \lambda, \quad \frac{\partial P}{\partial \beta_s} = -Z_s \lambda$$

となる。

$$\alpha_l = \alpha_l' + \Delta \alpha_l, \quad \alpha_s = \alpha_s' + \Delta \alpha_s$$

$$\beta_l = \beta_l' + \Delta \beta_l, \quad \beta_s = \beta_s' + \Delta \beta_s$$

とし、 $P(\alpha)$ をTaylor展開すると

$$\begin{aligned} P(\alpha_l, \alpha_s, \beta_l, \beta_s) &= P(\alpha_l', \alpha_s', \beta_l', \beta_s') + \left(\frac{\partial P}{\partial \alpha_l}\right)_{\alpha', \beta'} \cdot \Delta \alpha_l \\ &\quad + \left(\frac{\partial P}{\partial \alpha_s}\right)_{\alpha', \beta'} \cdot \Delta \alpha_s + \left(\frac{\partial P}{\partial \beta_l}\right)_{\alpha', \beta'} \cdot \Delta \beta_l + \left(\frac{\partial P}{\partial \beta_s}\right)_{\alpha', \beta'} \cdot \Delta \beta_s \end{aligned}$$

となり、観測方程式は、 q 個の測定点 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q$ に対して

$$\begin{aligned} (Z_l)_{\alpha', \beta'} \cdot \Delta \alpha_l + (-Z_s)_{\alpha', \beta'} \cdot \Delta \alpha_s + (Z_l \lambda)_{\alpha', \beta'} \cdot \Delta \beta_l \\ + (-Z_s \lambda)_{\alpha', \beta'} \cdot \Delta \beta_s = P - Q \end{aligned}$$

となる。これは線形であるから、ガウスの方法を用いて $\Delta \alpha_l, \Delta \alpha_s, \Delta \beta_l, \Delta \beta_s$ が求まる。以下、逐次近似の方法で $\alpha_l, \alpha_s, \beta_l, \beta_s$ 、おなわち $\mu_l, \mu_s, \sigma_l, \sigma_s$ を求める（一瀬, 1953）。

本実験では $\mu_l, \mu_s, \sigma_l, \sigma_s$ の閾値を0.001として繰り返しによって得られた各パラメータの値がこの閾値以上の差をもたない時に繰り返しを止めるようにした。

付録V 色覚モデルによる波長弁別関数の求め方

Boynton (1979) の色覚モデル (Fig. A.2) による理論的波長弁別関数の計算方法を以下に述べる。詳細は Boynton (1979) を参照されたいが、ここではその概略を記すことにある。

まず、3種の錐体、すなわち、R、G、B錐体の感度を次のようにする (Smith and Pokorny, 1975)。

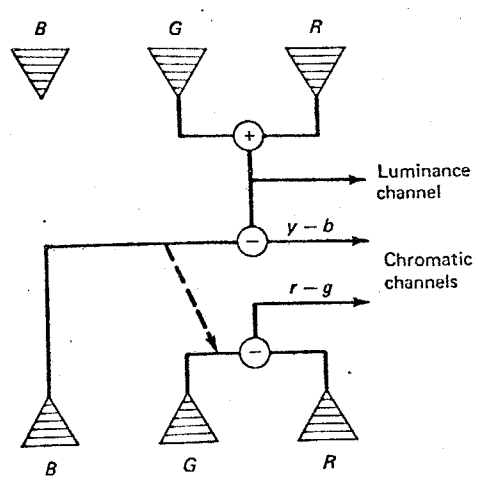


Fig. A.2 Boyntonの色覚モデル

$$S_R = +0.15514 \bar{x} + 0.54312 \bar{y} - 0.03286 \bar{z}$$

$$S_G = -0.15514 \bar{x} + 0.45684 \bar{y} + 0.03286 \bar{z}$$

$$S_B = 0.00000 \bar{x} + 0.00000 \bar{y} + 0.001608 \bar{z}$$

ただし、 $(\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda)$ は Judd のカラーマッチング関数 (Color-matching function) である (Wyszecki and Stiles, 1967)。

次に輝度一定の条件、すなわち $R+G = \text{一定}$ と考え、この時の R 錐体の出力 $R' = R / (R+G)$ を求める。10nmおきの R' の値から 変化量 $\Delta R'_{10}$ を求め、それを 10 で割り、1nmおきの変化量 $\Delta R'$ と計算する。さらに、 $J = 1 + |R' - 2G'|$ 因子で補正し、最終的な $\Delta \lambda_{r-g} = k_{r-g} \cdot J / \Delta R'$ を求める。J 因子は r-g チャンネルの明るさ (brightness) への寄与に相当するものと考えられている。係数 k_{r-g} は、実験データに合わせるための任意の係数で $\lambda = 585 \text{nm}$ 付近で $\Delta \lambda = 1 \text{nm}$ とすると 0.004 になる。

r-g チャンネルの出力は $(r-g) = R - 2G$ であるから

$$\Delta (r-g)' = \Delta (R - 2G) / (R+G) = \Delta (R' - 2G') = 3 \Delta R'$$

となり $\Delta (r-g)'$ は $\Delta R'$ の実数倍で表わされる。

同様に B 錐体の出力も輝度一定で考えて $B' = B / (R+G)$ を求め、
 $\Delta B' / B' + 0.016$ を計算する。この場合も同様に $\Delta \lambda_{y-b} = k_{y-b} (B' + 0.016 / \Delta B')$
 を実験データに合わせて k_{y-b} を決める。 k_{y-b} は $\lambda = 480 \text{ nm}$ 付近で
 $\Delta \lambda = 1.16$ とあると 0.08 となる。

$y-b$ チャンネルの出力は $(y-b) = B - (R+G)$ であるから $R+G =$ 一定
 のときは $\Delta(y-b)' = \Delta(y-b / (R+G)) = \Delta B'$ となり $\Delta(y-b)'$ は $\Delta B'$ で表
 わされる。

本実験では、実験 II で求めた測定点に $\Delta \lambda_{r-g}$, $\Delta \lambda_{y-b}$ をあてはめ、
 係数 k_{r-g} , k_{y-b} を求める。 $\lambda = 460 \sim 500 \text{ nm}$ の波長範囲の結果を用
 いて、 $\Delta \lambda_{y-b}$, $\lambda = 430 \sim 450 \text{ nm}$, $510 \sim 630 \text{ nm}$ (平均値, SO),
 640 nm (KU, HU) の結果を用いて $\Delta \lambda_{r-g}$ をあてはめた。

ここでは $r-g$ チャンネルにおける短波長域での B 錐体の関与を考えた
 かったが、これはこの関与に関しては議論も多いため、最も簡単なモデルを採
 用したためである。

Table A. 1 に各被験者、および平均値に $\Delta \lambda_{r-g}$, $\Delta \lambda_{y-b}$ をあてはめた
 時の係数 k_{r-g} , k_{y-b} を示す。

Table A1 3被験者及び平均値に弁別関数をあてはめた時の
 係数 k_{r-g}' , k_{y-b}' の値。

	SOA (msec)			
	0		550	
	k'_{r-g}	k'_{y-b}	k'_{r-g}	k'_{y-b}
KU	1.036	1.238	2.333	3.251
HU	1.640	2.209	3.509	5.455
SO	1.370	1.665	2.506	3.750
Mean data	1.366	1.704	2.918	4.152

$$k_{r-g} = k'_{r-g} \times 0.004$$

$$k_{y-b} = k'_{y-b} \times 0.08$$