

## 実体顕微鏡を用いた微細領域に於ける奥行弁別作業 に関する研究

四宮, 孝史

<https://doi.org/10.11501/3110732>

---

出版情報：九州芸術工科大学，1995，博士（工学），課程博士  
バージョン：  
権利関係：

氏名・本籍(国籍) 四宮孝史(東京都)  
学位の種類 博士(工学)  
学位記番号 甲第2号  
学位授与の日付 平成8年3月18日  
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当  
学位論文題目 実体顕微鏡を用いた微細領域に於ける奥行弁別作業に関する研究

究

審査委員会 幹事 教授 佐藤陽彦  
委員 教授 山下茂樹  
委員 助教授 山下由己男

#### 論文内容の要旨

運動視差の影響を排除し、奥行知覚の主要因であると考えられる両眼視差に注目して、実体顕微鏡を用いた両眼視による微細領域に於ける奥行知覚に関する研究を行った。具体的には、奥行弁別に於ける視認性に影響を及ぼす要因と学習効果に関する実験を行うことで、両眼視差要因による奥行弁別機能について検討した。本論文は6章から構成されている。

第1章では、両眼視による奥行弁別作業に於ける特徴と問題点、ならびに奥行弁別機能に関するこれまでの研究動向を吟味し、本研究の目的とその対象を明確にした。即ち、運動視差と両眼視差はともに注視物体を基準とした物体間の相対距離検出であり、類似機能特性を有するが、両眼視差に注目した本研究に於いては、従来の実験研究ではあまり明確に区別されていなかった網膜上にできる像差を、両眼視差と、観察位置の移動により左右眼に生ずる網膜像の“ズレ”として検出される運動視差に明確に分けて捉える事で、両眼視差要因のみによる奥行知覚機能の研究の意義を明確にした。

第2章では、両眼視差による奥行知覚に於いて視認性に影響する観察視標の形態、輪郭線、配置の仕方について検討した。視認性の高い形の場合には、形の差や配置方法の違いによる奥行弁別への影響は認められなかった。輪郭線に関しては、視標のエッジ(端面)の機械的な精度を高めることで視認性が高まることを確認した。

尚、本研究では奥行量の表現方法として視差角度を用いたが、両眼視差による奥行弁別には両眼視差の情報が重要であり、その条件の規定方法として「眼から視標までの距離」と「視標間の奥行距離」が必要となり、両方を規定するには相対角度による表現が適切と考えた。視認性の高い形に於ける奥行弁別閾は両眼視差角41秒近傍にあることを確認した。そして、奥行を視差角で表現することの合理性と有効性を示した。

第3章では、奥行知覚に於けるテクスチャ刺激(材質感)と被験者の熟練度の差異による観察方法の相違について検討した。視標のテクスチャ刺激情報は、微細なテクスチャ刺激のときには視認性を高める効果があるが、テクスチャ刺激が相対比較視標間の奥行量と等しいかそれ以上になると急速に錯視効果を高めて、極端に視認性を悪くするこ

とが明らかになった。

熟練者と非熟練者の観察方法の比較から、熟練者に於いては、視差角の減少に伴い途中で、視標の「部分観察」から「集群観察」へと観察方法を切り替えることにより錯視を生じ難くしていることが推察された。非熟練者の弁別能力を高める方法としてこの“観察方法の途中切り替え”の有効性を提案した。

第4章では、奥行弁別で機能していると考えられる焦点調節機能について検討した。視標が眼の焦点深度内に入った後の注視点の決め方が、奥行弁別精度に大きく影響することが明らかになった。そこで、眼の焦点調節時に眼の光学的特性を活用した。奥行弁別能力を高める方法を提案した。そして、奥行弁別精度を高めるための短時間注視（7秒以下の注視作業）の有効性と、長時間注視（10秒以上の注視作業）が弁別感度ならびに弁別精度の低下をきたすことを実験により明らかにした。

次に、奥行弁別に於ける両眼視と単眼視の比較、および単眼視に於ける利き眼を考慮した右眼と左眼の比較から、単眼視より両眼視の奥行弁別が優れていることが確認された。単眼視に於いては、利き眼と関係なく、奥行弁別能力は左眼より右眼が優れていることが推察された。

第5章では、融像困難あるいは不可能な者に対する融像性輻輳機能の訓練方法について検討した。実験の結果から“融像機能の習熟訓練”は、多くの場合は単に眼筋の使い方の“きっかけ”を作る作業で、一度そのコツがつかめると急速に融像が可能になることを明らかにした。左右眼の像を融像困難な者でも“眼筋の使い方の訓練不足”を原因とする場合には、両眼に1~2Prism Diopter（ ）づつプリズム強度を付加する眼筋訓練の方法を、短時間で速効性のある訓練方法として提案した。

第6章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題について検討を加えた。そして、「調節や輻輳は生後6ヵ月前後で習熟訓練によって形成される機能である」とする輻輳に関する従来の考え方の規定や表現方法を、「大半のヒトの場合には、調節や輻輳は生後6ヵ月前後で習熟訓練によって形成される機能であり、日常生活を営む上で必要なある程度の輻輳力や開散力は、経験の程度に応じて固体差が生ずる機能である」という強度程度を条件として併記すべきではないかとの提案を行った。論文審査の結果の要旨

高度技術の発達は人間に様々な新しい様相の作業をもたらすようになった。実体顕微鏡による高密度に実装された半導体集積回路やプリント基板などの積層構造の外観検査もその一つであり、微細領域に於ける奥行弁別が必要とされる作業である。一方、奥行知覚に関してはWheatstone(1838)以降多くの研究がなされており、奥行知覚には両眼視差、運動視差、輻輳眼球運動、網膜像の大きさ、焦点調節など様々な要因が関与していると考えられているが、未だ不明な点も多い。本論文は、実体顕微鏡下の微細領域における両眼視による奥行弁別作業と習熟効果について、人間工学的視点から研究を行ったものである。

第1章では、奥行弁別作業に於ける特徴と問題点、ならびに奥行弁別機能に関するこれ

までの研究動向を吟味し、本研究の目的とその対象を明確にしている。実体顕微鏡を用い、奥行知覚の主要因の一つである運動視差の影響を排除し、両眼視差要因に注目して奥行知覚機能を研究するという発想は独創的である。

第 2 章では、両眼視差による奥行知覚に於いて視認性に影響する観察視標の形態、輪郭線、配置の仕方について検討している。本研究では、奥行量の表現方法として両眼視差角度を用いており、奥行弁別閾値を弁別率で 70% で規定しているが、これらは妥当である。正方形や円のように視認性の高い形の場合には、奥行弁別閾は両眼視差角 41 秒近傍にあり、形の差や配置方法の違いは奥行弁別へ影響しないが、輪郭線情報の欠如は弁別閾値を高めることを見いだしている。

第 3 章では、視標のテクスチャ刺激情報は、微細なテクスチャ刺激のときには視認性を高める効果があるが、テクスチャ刺激が相対比較視標間の奥行量と等しいかそれ以上になると急速に錯視効果を高めて、極端に視認性を悪くすることを明らかにしている。また熟練者と非熟練者の観察方法の比較から、熟練者に於いては、視差角の減少に伴い途中で、視標の「部分観察」から「集群観察」へと観察方法を切り替えることにより錯視を生じ難くしていることを推察し、非熟練者の弁別能力を高める方法としてこの“観察方法の途中切り替え”の有効性を提案している。

第 4 章では、奥行弁別における焦点調節機能について検討している。視標が眼の焦点深度内に入った後の注視点の決め方が、奥行弁別精度に大きく影響することを明らかにし、眼の焦点調節時に眼の光学的特性を活用した、奥行弁別能力を高める方法を提案している。そして、奥行弁別精度を高めるための短時間注視（7 秒以下の注視作業）の有効性と、長時間注視（10 秒以上の注視作業）が弁別感度ならびに弁別精度の低下をきたすことを実験により明らかにしている。次に、単眼視より両眼視の奥行弁別能力が優れていることを確認し、単眼視に於いては、利き眼と関係なく、奥行弁別能力は左眼より右眼が優れていることを推察している。

第 5 章では、実験の結果から、左右眼の像を融像困難あるいは不可能な者でも“眼筋の使い方の訓練不足”を原因とする場合には、両眼に 1~2Prism Diopter ( ) づつプリズム強度を付加する眼筋訓練の方法を、短時間で速攻性のある訓練方法として提案している。

第 6 章では、得られた成果を総括し、今後の課題について検討を加えている。

本論文は人間の奥行知覚研究に新たな知見を加えるとともに、実体顕微鏡を用いる作業における、観察方法の改善による負担の減少や一部作業の機械化に資するものである。よって、審査委員一致して博士（工学）の学位論文に値するものであると認めた。

#### 最終試験の結果の要旨

本論文についての試験は、概要について申請者の説明を求めた後、各審査委員より専門的観点から論文の内容および関連事項について質問を行ったが、何れにも適切な回答が得られた。

次に、人間工学および関連分野の研究者の出席のもと生活環境専攻主催の公開発表会が

開かれ、申請者の発表に対して質疑応答を行ったが、申請者から質問者の納得のゆく説明が得られた。

以上の結果から、審査委員合議のうえ、試験は合格と決定した。

# 目 次

## 第1章 序論

1. 1	はしがき	1
1. 2	奥行の知覚と弁別	4
1. 3	従来の研究	7
1. 4	研究の目的	9
1. 5	本論文の構成	10

## 第2章 奥行弁別作業に於ける視認性要因について

2. 1	緒言	12
2. 2	研究方法	12
2.2.1	実験方法	14
2.2.2	実験条件	23
2. 3	結果と考察	24
2. 4	結論	27

## 第3章 奥行弁別作業に於ける錯視要因と学習効果について

3. 1	緒言	29
3. 2	研究方法	
3.2.1	実験方法	30
3.2.2	実験条件	31
3. 3	結果と考察	34
3. 4	結論	48

第4章 焦点調節機能と熟練度について	
4.1 緒言	51
4.2 研究方法	
4.2.1 実験方法	52
4.2.2 実験条件	54
4.3 結果	56
4.4 考察	65
4.5 結論	72
第5章 融像性輻輳機能の訓練効果について	
5.1 緒言	74
5.2 研究方法	75
5.2.1 実験方法	75
5.2.2 実験条件	76
5.3 結果と考察	79
5.4 結論	83
第6章 総括	84
謝辞	89
参考文献	90

## 第1章 序論

### 1. 1 はしがき

産業用ロボットに象徴される無人化や自動化の技術は、高度経済成長という時代の波に乗って急速に発達し普及した。しかし、景気の低迷期を迎えて、機会利益や機会損失の考え方にもとづく生産性や採算性だけを重視した技術導入の論拠を見直そうとする動きが出始めている。機械が本当に人間に取って替わらなければならない理由や、要求される場面とはなにかを、開発する側も、使う側も自問自答しているのである。

自動化機器の導入は、人間を筋的労働から開放したが、長時間に及ぶ単調労働や精神的緊張作業などの神経疲労を高める作業の増大をきたしてしまった。

そして今、生理的・心理的作業負担の軽減や、本当に省人・省力化を必要とするニーズについて考え直す機運が高まっている。1987年から国レベルでの積極的な支援も始まった”生体機能模倣工学”は、技術革新の手段として発想や着想を、脳機能や神経伝達回路の原理を学ぶことで、コンピューターの高速度演算回路の設計に応用しようとする考え方や、微生物の運動機能を模倣した超小型アクチュエーターの開発などの分野で徐々に成果をあげている。生体機能を模倣する技術と相俟って、技術革新についての倫理感や思想が少しずつ変わり始めていることを感じるこのごろである。

合理化、省人化技術は、人間がより人間らしく生活するための手段として、意図されて技術開発が図られるべきものとの考え方が再度確認されている。

産業分野を含めて社会生活において、人間の五感、すなわち、視覚、聴覚、嗅覚、味覚、皮膚感覚に関する機能研究は、官能検査の分野を中心に省人化を目的に発達してきたが、前述のような人間を補佐したり支援したりする自動化技術について、その設計思想を含めた見直しが図られている。

視覚機能の研究分野では、監視作業などに代表される単調労働として、人間に



取って替わるべき電子化や機械化技術が進歩してきたが、最近の動向としては、更に一步考え方を進めて高度な神経的緊張による視覚疲労や神経的疲労を解消したり、その判断を補完する分野にまで対象が広がってきている。

情報化社会の発達、光学的な受光素子や表示素子の発達によるハードウェアの急速な発達、半導体の高密度実装技術、高速演算回路の実現、そして高品位テレビモニターの実用化などの技術に支えられて可能になったことは云うまでもない。

同様に、電子画像による景観などの環境シュミレーションの技術や医療用の高精細な画像ファイリング技術、また、それらの情報を遠隔地へ伝送する技術などが実用化されて飛躍的に進歩しはじめている。

これらの技術の研究分野では、高精細な画質の要求だけに留まらず、「人工現実感 (artificial reality)」や「仮想現実感 (virtual reality)」と呼ばれるソフトウェア技術を含めた画像表現技術の確立へと研究対象が移り始めている。

人間が情報として入手する手段の80%以上をつかさどると云われる視覚分野での研究課題はますます増えることが容易に想像される。

このような背景を踏まえて、視覚系に於ける認知機能を工学的に再現したり模倣しようとする試みが盛んに行われている。そして、視覚による形態と質感の認識や判別の機能である、人間の3次元空間認識特性についての研究がさまざまな観点から盛んに行われている。

また、生活のあらゆる場面に於いて、近年の高度な科学技術の進展に対応するかのように、微細領域に於ける拡大画像情報を得る手段や、画像情報の圧縮手段として、顕微鏡構造を持った光学的な拡大と縮小のシステムが多用されている。

その代表的な事例として、CDのピックアップレンズがあげられる。これは光学的に拡大した微細情報を電気信号として処理する情報ファイリングと検出のシステムである。

その他にも人間の眼の補助的機能としての拡大像を得るシステムが盛んに活用されており、用途や活用の機会は益々増大する傾向にある。医学分野では病理検査などに、工業分野では極微細形体部品の精密組み立ての補助手段や、その検査手段として活用されている。特に半導体産業の高密度実装された集積回路やその実装に於ける目視観察の補助手段として顕微鏡が大量に使われている。

また、プリント基板などの積層構造となっている部品やユニットの観察には、立体視を得ながら観察することができる実体顕微鏡が多用されている。そして被検物の積層構造体の厚さ情報や積層構造の中間層の側面構造などの欠陥検査や異物検査などにも活用されている。

これらの顕微鏡やその観察者には、更に微細構造をより高解像度に、そして高速に、効率良く観察する改善努力が常に要求され続けてきた。そして、前述の高品位カメラやモニターの開発、そしてコンピューターによる画像処理技術の発達に支えられた無人化や自動化の技術成果が得られている。

しかし、処理時間やその精度は、まだまだ人間による観察や処理に勝るまでには至っていない。そこで、生物の視覚系を解明したり模倣することによって、より人間に近いシステムを築こうという方法による改善努力が続けられている。

本論文では、奥行弁別作業に於いて人間の視機能が対応できない場面が多くなっていることに注目して、実体顕微鏡を用いた微細領域に於ける質感認知、あるいは立体視という観点からのヒトの眼の奥行量の知覚に関する研究を行った。

具体的には、奥行知覚認知のための主要因である両眼視差（両眼網膜像差）に基づく奥行量（手がかり）の知覚とその弁別を行うための要因として、質感

（ texture ）認知の機能に注目した極微細領域に於ける奥行弁別に関する”視認性”、”錯視”、”経験・記憶・学習”に関する実験と、奥行弁別に於ける焦点調節機能、ならびに融像性輻輳機能に関する実験を通した両眼視による微細領域に於ける奥行弁別機能に関する研究を行った。

そして、実験研究によって疲労や錯視を含めた眼の構造、機能、特性を解明し理解することから、新しい立体画像表示素子の構造や画像表示システムに付加すべき機能の提案やフラットディスプレイへの活用を含めた新しい立体画像表現手法の確立をめざした研究として、より高度な仮想現実感の表現手法への発展が考えられる。また、実体顕微鏡を研究の手段として用いたことから、顕微鏡に於ける目視による立体視観察方法の基準設定や、立体視に必要な視機能訓練の方法の確立へと応用されることが期待される研究を行った。

## 1. 2 奥行の知覚と弁別

ヒトの空間知覚の処理システムの機能を整理すると、「パターン認識」と「絶対的な空間認知機能」とに分けられる。また、絶対的な空間認知機能は、互いに独立な2つの機能（視方向の認知機能と視距離の認知機能）に分けられる。

そして、それぞれのシステムが異なる種類の視空間情報を処理している。

視距離の認知機能は更に、「眼から視標までの距離 (egocentric distance)」を処理するシステムと「視標間の距離 (exocentric distance)」を処理するシステムの2つのサブシステムに分けられる。そして、さまざまな網膜信号あるいは眼筋などの網膜外信号を処理することによって、距離や奥行に関する手がかり情報を得ていると考えられる。

また、視知覚される位置の変化による視対象の見かけの位置の変化、あるいは見かけの方向の差を視差(parallax)という。視差は距離や奥行の手がかりといわれる。そして、左右眼の位置の差による変化を両眼視差(binocular parallax)あるいは両眼網膜像差(binocular retinal disparity)とよぶ。

1838年に、この両眼網膜像差が強い奥行の印象を生むことが実験により明らかとなった(Wheatstone, 1838)。以降、さまざまな要因と網膜像差が生み出す奥行との関係に関する実験が行われている。

奥行知覚（すなわち、視距離の計測）には、両眼視差、運動視差、輻輳眼球運動、ピント調節、像の大きさによる判断などの方法があるが、ヒトは主として両眼視差により奥行情報を得ていると考えられている。

両眼視差法は、細かい立体構造を一度に把握する場合などに適しているが、視標のテクスチャが同じパターンの繰り返しなどの場合には、錯視を生じ易いことなど、多様な視環境のもとでは、奥行情報を得るには一つの測定方法だけでは精度、確度、安全性などの面から万能な方法が無く、幾つかの方法を併用することで信頼性を高めているものと解釈される。また、ピント調節機能によって距離判断の精度を高めている。すなわち、ピント検出精度を高めるには、一眼レフカメラのように、焦点距離の長い、レンズの開口径が大きく、明るい光学系を有する構造が必要がある。そして、大きな眼を持ち瞳孔径が大きく”浅い焦点深度”となるような光学系が求められる。しかし、ピンボケを検出して、そのボケ量を小さくするためのピント調節のメカニズムがヒトの距離判断にどれだけ有効に作用しているかは、議論のあるところである。

また、視知覚のための機能としては、頭運動による像のブレを防ぐための補償眼球運動のほかに幾つかの眼球運動があげられる。注視点をある位置から別の位置へ移す時の高速な視点移動運動である”断続性眼球運動（saccadic）”は顕微鏡作業などの注視作業に於いては、この機能を抑制したり矯正されることから”疲労”や”船酔い”の原因と成っていることが推察される。

また、”固視微動”は視点を一点に注視している状態での微小な眼球運動（振動現象）であるが、これは定常的な微震動(tremor)、間欠的な跳躍運動(flick)、そしてズレ運動(drift)とに分類される。これらは、注視作業に於いて、網膜上（静止網膜像）での像の消失などの順応効果を防止している不随意の運動であるが、注視作業には重要な働きを司っているものである。

長時間注視作業（ここでは10秒以上と定義する）を行う場合などには、固視微

動もある種の順応効果を生じ始めることが知られている。このために、奥行弁別閾値近傍など微細領域での距離計測の感度は時間とともに減衰していくことが十分に予測される。その他に、“追従運動 (smooth pursuit)” など運動物体を追従するために、広い視野範囲から正確な情報を取り込む機能なども関わっている。

また、一般に単眼視の場合には奥行量の検出には、その大半を焦点調節作用（網膜上に焦点を合わせるための水晶体を支える毛様体小帯と毛様体筋の緊張と弛緩作用）に依存していると考えられる。

また、過去の経験による知覚や像のボケを利用し活用しているという考え方もある。そして、両眼視の場合には、両眼輻輳（両眼球の網膜中心窩に対象の像を持ってくるための外眼筋による眼球の輻輳と開散運動により、注視線を特定の一点に集める作用）と両眼視差（奥行の異なる2点に輻輳したときの輻輳角の差）によって主として検出されていると考えられる（磯 1986; Rogers and Graham, 1979）。

また、運動視差もひとつの要因としてあげられる。“運動視差も両眼視差と類似の機能特性を有するものである”といわれ(中嶋と齋, 1990)、この機能の相似性や有効性についての研究報告もなされている(Blakemore and Julesz, 1971; 齋 1988)。

両眼視による奥行知覚は、輻輳により注視点を定め、両眼視差によって正確な立体視を得ていると考えられている。また、この一連の処理には時間的な差は無くほぼ同時に行われているともいわれている。

両眼視差とは、左右眼の視軸方向の差であり輻輳角によって表すことができる。

そして、異なる視位置に於ける輻輳角の差を両眼視差（両眼網膜像差）と定義する。網膜像差と絶対距離と奥行との間には、“両眼網膜像差が一定ならば、奥行は絶対距離の二乗に比例する”という両眼網膜像差の逆二乗法則と呼ばれる関係が成り立っている。

### 1. 3 従来の研究

奥行知覚に関する研究の歴史は古く、長い年月を掛けて数々の実験が試みられ、積み重ねられて現在に至っている。

Metzger(1953)「視覚の法則」の視知覚に関する学説史の概観ならびに中溝と齋田(1990)の「運動視差；研究史と最近の研究動向」などの報告のまとめによると、奥行を体系的にとらえるには、1709年Berkeleyの”新視覚論(a new theory of vision)”以降をとらえることが適切かと考える。すなわち、本来人間の眼には奥行の印象を媒介する能力は存在せずに、人間が見ていると思っている奥行は手足や全身による移動運動から得た情報をもとに判断していると推論されていた。

そして、Wheatston(1838)によって両眼網膜像差が強い奥行の印象を生むことが実験的にも示されていた。後にHeringの提唱により”眼の調節機能による奥行知覚や両眼視差による奥行知覚”の説明づけがなされるようになった。

1902年 Wundtの”視覚論”に至って、眼筋の感覚によって奥行知覚が想定され説明された。更に眼球運動である輻輳による説明づけがなされるが、まだ明確な説明づけには至っていなかった。

Heringの発見した”同一視方向の法則”によって、輻輳以外に、視対象や視方向の差異が距離知覚の相違を有効にし、網膜に於ける左右眼の二重像の遠近法的なずれ幅の差異、すなわち、”横のずれ”による説明が、両眼の奥行知覚に対する基本的な考え方と成っているとも云われる。

そして、左右眼の二重像の幅のずれと奥行の関係を具体的に示した”ニュールンベルグの鋏”や、空間像の観察図形であるHöberによる”一つの立体による二つの重ね図形”などによって、それらは説明づけがなされている。

そして、Wheatstone(1838)が眼の調節によっても、また輻輳によっても成就されない奥行感を、”人間の眼では驚くべき鋭敏さをもって、網膜像の横のずれ、あるいは幅の差異によって実現されている”と報告したことが、現在に至る両眼

の奥行知覚の基礎を築いたと一般的には云われている。

そして、数々の研究の成果を経た後に、両眼の像の融合に関する形態の法則へとたどり着くが、しかしこれも、眼の調節作用による説明付けと同じく限界があった。

奥行の弁別閾は視標までの距離に対応して大きく変わることが知られている。

視距離35cmの場合の閾は1/10mm以下であり、1 mの視距離では 1/2mmを越えることはないとも云われる。ところが、50mの視距離では、閾値は1～2 mに達し、視距離 500mでは、閾値は 100m以上に増大し、視距離が1300～2600mに達すると、距離の差が無限大であってもそれはもはや有効な奥行の差を生じないと云われる。また、両眼の間隔が閾値に大きく影響していることも知られるようになった。すなわち、両眼の間隔（両眼回旋点間距離）が僅かに増加しても、奥行知覚の精度は明らかに向上することが明らかとなった(Metzger, 1953)。

Tschermak-Seysenegg(1939)の両眼視差と運動視差にもとづく奥行弁別閾の比較実験によると”両眼視差による奥行弁別閾は視距離210mmの場合には0.5mm”との報告もなされているが、この時の実験条件として頭運動の統制や両眼回旋点間距離などの個人差要因については、明確な規定はなされていなかった。

また、Hell(1978)の実験では、奥行の規定は両眼視差のほかに”角度的距離”と”背景野までの距離”に大きく依存するという考え方が提唱されている。

1979～1985年にかけてのRogers and Grahamによる奥行絶対閾に関する極限法を用いた研究では、”両眼網膜像差と運動網膜像差による視差では、どちらも空間周波数特性が0.2~0.5c/degの時に閾値は最小となり、空間周波数特性がその値より小さくても大きくても奥行感度は悪くなった”と報告されている。

また、Blakemore and Julesz(1971)は両眼視差による奥行に関する継時的コントラスト効果（残効）の存在を明らかにしている。

最近の研究では運動視差も両眼視差と類似の機能特性を有するという報告(舩,

1988) もなされている。また、両眼視による奥行の知覚を得るには、まず輻輳により注視点を定め、更に両眼視差によって正確な立体視を得るものと考えられているが、これらの要因とその特性について、頭運動や照度など視認性の要因による影響を生じさせないようにした方法で、視標表面のテクスチャ（すなわち材質感）量を定量的にとらえて、視認性要因として扱った、極微細領域に於ける奥行量の弁別閾に関する研究報告は見当たらない。

#### 1. 4 研究の目的

両眼視差も運動視差も、どちらも注視物体を基準位置とした物体間の相対距離検出であり類似機能特性を有するが、両眼視差機能に注目した今回の研究に於いては、両眼単一視した時に網膜上にできる像差として検出される両眼視差と、観察位置の移動によって左右眼に生ずる網膜像のズレとして検出される運動視差を分けて捉えることで両眼視差要因による奥行弁別機能の研究を行うものである。

そして、奥行弁別作業を通じてヒトの眼の両眼視による微細領域に於ける奥行知覚の機能と、その特性を明らかにすることで、実体顕微鏡などによる奥行弁別の視知覚作業に於けるヒトの特質を考慮した作業の信頼性の限界と効率性、快適性向上のための施策について検討を加えることを目的とした。

具体的には、微細領域に於ける奥行弁別作業では、その精密な位置決めには輪郭線刺激情報を含めた質感情報が重要な要因の一つと考える。すなわち、Z軸方向の情報だけでなくXY軸上の刺激情報を含めた考え方が重要と考えている。

今回の実験では、観察視標にテクスチャ刺激情報を有する視標を用いたことで、結果として従来の奥行知覚研究では得難かった成果が得られた。



## 1. 5 本論文の構成

本論文の題目は、「実体顕微鏡を用いた微細領域に於ける奥行弁別作業に関する研究」とし、全6章により構成する。各章の内容は次のようである。

第1章「序論」では、本研究を行うに至る背景に言及し、両眼視による奥行弁別作業に於ける特徴と諸問題、ならびに弁別機能に関するこれまでの研究の動向を吟味し、本研究の必要性を示した。次に、本研究に於ける作業対象をこの種の作業に於ける代表的例でもあり、奥行知覚の特性要因を制御しやすい実体顕微鏡による作業と限定することで、研究対象を明確にし、前述の研究目的をも明確にした。

第2章「奥行弁別作業に於ける視認性要因について」では、本研究に於ける「奥行弁別」の定義を明確にした。また、作業の視認性を論ずる上で最も基本となる人間の特性を取り上げるべく、作業者を熟練者のみ扱うことで、奥行弁別に関するそれぞれの特性要因についての相対比較実験を明確に位置づけた。

また、奥行を両眼視差で表現することの合理性と、両眼視差と運動視差の機能を明確に区別して捉えることの有効性を提案した。そして、両眼視差による奥行弁別に於ける認知の手がかりとなる要因として、視標の形体、輪郭線、材質感（テクスチャ）と視認性との関わりを明らかにした。

第3章「奥行弁別作業に於ける錯視要因と学習効果について」では、被験者の熟練度の差異による観察方法の相違に注目して、弁別感度を高める観察方法の存在を明らかにした。また、同時に錯視効果因子に関する実験結果を踏まえて、錯視を生じ難い奥行弁別に於ける観察方法の提案を行った。

まず、被験者を熟練者と非熟練者に分けて捉えることによって視認性、錯視、観察手法、学習効果などの要因を明らかにした。そして、錯視や誤認などを生じ難くする観察手法を明らかにした。

第4章「焦点調節機能と熟練度について」では、眼の機能を眼光学的に捉えて、焦点調節機能の特性を活用した奥行弁別能力を高める方法を提案した。また、注視時間と注視方法との関係を実験をとおして分析し、短時間注視の有効性を示した。すなわち、注視点の決め方と短時間注視によって、奥行弁別精度を高めることができることを明らかにした。そして、利き眼の影響についても実験をとおして考察を加えた。

第5章「融像性輻輳機能の訓練効果について」では、両眼単一視融像作業が困難な者に対する輻輳力ならびに開散力を測定する過程に於いて、輻輳力を高める方法を明らかにした。

また、実験によって効率的な訓練方法を示すことができた。

第6章「総括」では、本研究で得られた成果を総括し、両眼視による微細領域での奥行弁別作業に於ける今後の課題について検討を加えた。

尚、第2章と第3章は日本人間工学会誌「人間工学」30巻1号に掲載された「実体顕微鏡を用いた微細領域における奥行弁別作業と習熟効果に関する研究」(西館と炊保, 1994)に、第4章は日本人間工学会誌「人間工学」に投稿した「奥行弁別作業に於ける眼の焦点調節機能とその訓練方法に関する研究」に基づいている。

## 第2章 奥行弁別作業に於ける視認性要因について

### 2.1 緒言

奥行知覚（すなわち、視距離の計測）に及ぼす視認性要因は、照度、陰影、反射光、背景野などがある。そして、それぞれの感覚が複合して奥行の手掛かりに関する要因となって関わっている。

ここでは、高野(1981)による図形認識装置開発の過程に於いて実験分類された視認性の高い代表的な形態の2種類を視標に選び、視認性の高い形態による奥行弁別の比較、次に視標の輪郭線情報が奥行弁別に与える影響について、そして質感(texture)情報が奥行感に及ぼす影響について、熟練者による相対比較実験による奥行知覚に関する研究を行った。

具体的には、実体顕微鏡を用いて両眼視差による奥行弁別閾値近傍に於ける弁別の手掛かりとなる観察視標の形態や輪郭線による視認性と観察視標が有する材質感の違いによる視認性への影響に関する実験を行い、微細領域に於ける奥行弁別に優位な観察方法や視機能の使い方について考察を加えた。

### 2.2 研究方法

奥行弁別の評価方法及び使用する用語の定義を次のとおり定めた。

奥行弁別は、 $\text{人数弁別率}(\%) = \text{弁別できた人数} \div \text{試行人数} \times 100$

$\text{正答率}(\%) = (\text{正答数} + \text{弁別不能数}) / (\text{総試行回数}) \times 100$

で表現した。

尚、当章に於ける弁別率ならびに弁別不能率とは、特にことわりの無い限りは人数弁別率ないし人数弁別不能率を示す。また、この時の弁別不能数とは、錯視効果による誤認は生じていないが、弁別の判断はできないと回答した被験者の人数である。そして奥行弁別閾は弁別率70%と規定した。

今までの奥行知覚の研究に於いては、研究方法の差異はあるものの弁別閾を弁別率60%とする考え方が多かった。しかし、錯視率の高まりを考慮した場合の閾値としては60%ラインが適正閾と考えることには疑問がある。

錯視率の高まりを勘案した今回の実験結果からは、弁別閾値近傍に於ける急速な弁別率の低下と、この時の錯視率の高まりとを勘案した結果、弁別率70%が閾値として適正な基準値と判断した。また、正答率に弁別不能数を加えている理由は、弁別不能と知覚できていることを重視したことによる。すなわち、弁別不能は誤認ではないとの定義づけをおこなっている。しかし、逆に正答率には弁別不能という弁別できていない回答を含んでいることから、正答率で弁別閾値を論ずる場合などには不都合をきたす。ここでは、正答率の扱い方には慎重をきした。

また、錯視とは、知覚が客観的事実と一致しない間違っただけの知覚、すなわち誤認を生じさせる情報の程度と位置づけ、

$$\text{錯視率 (\%)} = 100 - (\text{弁別率} + \text{弁別不能率})$$

$$\{ \text{人数弁別不能率 (\%)} = \text{弁別不能回答人数} \div \text{試行人数} \times 100 \}$$

で表現した。

$$\text{そして誤認とは、誤認率 (\%)} = \text{誤答人数} / \text{試行人数} \times 100$$

と表現した。

すなわち、錯視と誤認についての定義の明確な分離は、ここでは行っていない。

また、誤答（誤った答）には、錯視効果による判断の誤りの他に、弁別できていない状況のもとで曖昧情報にたよった判断の結果を含める。これは、非熟練者に多く見られる偶然的な正答確率を期待した”意気込み”による回答の結果を含めているが、被験者にはあらかじめ回答方法を指定することで、故意による”意気込み”判断は排除するように努めている。

また、”弁別不能”については、被験者が判断ができない状態の表現方法として事前の回答表現方法を指示した後に用いた。そして、被験者の回答方法は、左

右の視標のどちらが手前（近く）に在るか、あるいは等しい位置に在るか、回答させる方法を用いた。

同一視差角での試行回数と回答回数は一回限りとして、口頭で奥行量についての差異判断を求めた。

視差角による奥行量の実験値は、各実験毎の条件において示すとおりである。

視標を観察位置の左右へ配置する場合の遠近の組合せや奥行量の違いに関する実験順序などは、ランダム配置として事前にその組合せを決定しておいた。

同一実験内での各試行間隔は2～3分とすることで継時的コントラスト効果（残効）などの影響を排除した。

実験結果についての表現方法は、視差角による奥行の表現方法を使用しているが、両眼視による奥行弁別には、両眼視差の情報が重要な要因と考えることから、この時の条件の規定方法としては”眼から視標までの距離”と”視標間の奥行距離”が必要となる。その両方を規定するには、相対角度による表現が適しているとの考えにもとづくものである。

### 2.2.1 実験方法

実験には、左右独立した光学系を有する実体顕微鏡を用い、視標を固定し、頭運動を統制する事で運動視差の要因を排除した。

さらに、観察距離の固定、両眼輻輳角、両眼回旋点間距離の矯正、接眼レンズ系による光学的な視力補正のほか、プリズムを使用して両眼回旋点間距離の個人差を同一光路上へ光学的に導く方法によって、その距離を一定に保つことで、視標の視認性要因の一つである個人差を排除して、両眼視差要因に限った奥行知覚の弁別関に関する実験を行った（Östberg and Moss, 1984 ; Macleod and Bannon, 1973 ; Robinwitz et al., 1981）。

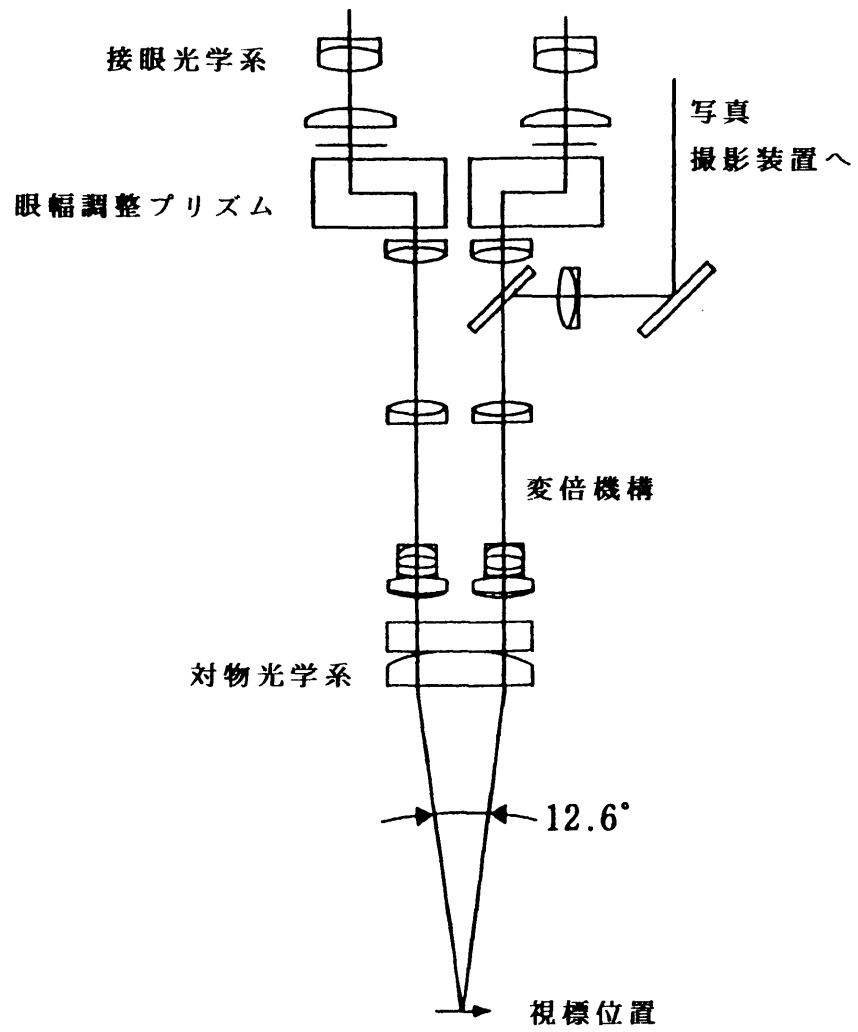


図 2 - 1 実験装置と構成

実験装置の原理と構成は、図2-1ならびに図2-2の通りである。

実験結果の表現方法として、奥行量を距離で表す方法と、両眼視差角（距離からの換算値）で表す方法とがあるが、前述のとおりここでは視差角度による表現方法をとった。

観察距離は、図2-3に示したとおりである。

また、奥行量とその両眼視差角（ $2\alpha_3$ ）の算出方法は次のとおりである。

$f_1$  : 第1対物レンズの焦点距離

$f_2$  : 中間結像系の合成焦点距離

$f_3$  : 接眼レンズの焦点距離

$h$  : 左右光軸間距離の 1/2

$x$  : 視標物体面での奥行距離

Newtonの公式  $x x' = f^2$  から、

$$x' = f_1^2 / x$$

これより  $\alpha_2 = h / (x' + f_1)$

$$(\because x \ll f_1, x' \gg f_1)$$

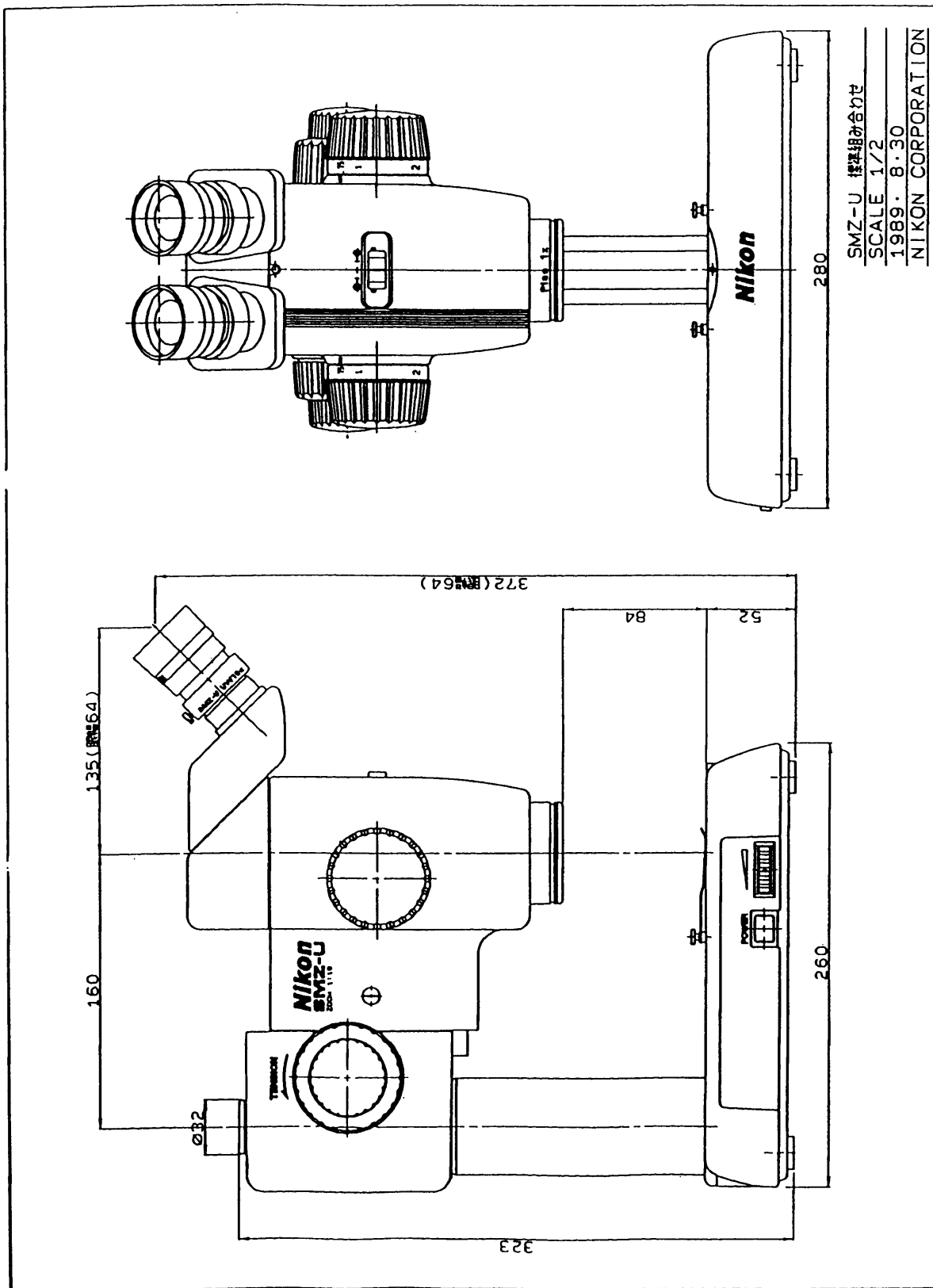
$$\alpha_2 = h / (f_1^2 / x + f_1)$$

$$\alpha_2 = h x / (f_1^2 + f_1 x)$$

ところで  $\alpha_2 / \alpha_3 = f_3 / f_2$  であるから

$$\alpha_3 = (f_2 / f_3) \alpha_2$$

$$\therefore \alpha_3 = (f_2 h x) / \{ f_3 (f_1^2 / f_1 x) \}$$



©PA. GAI SMZ-U-1

図 2 - 2 観察装置光学系



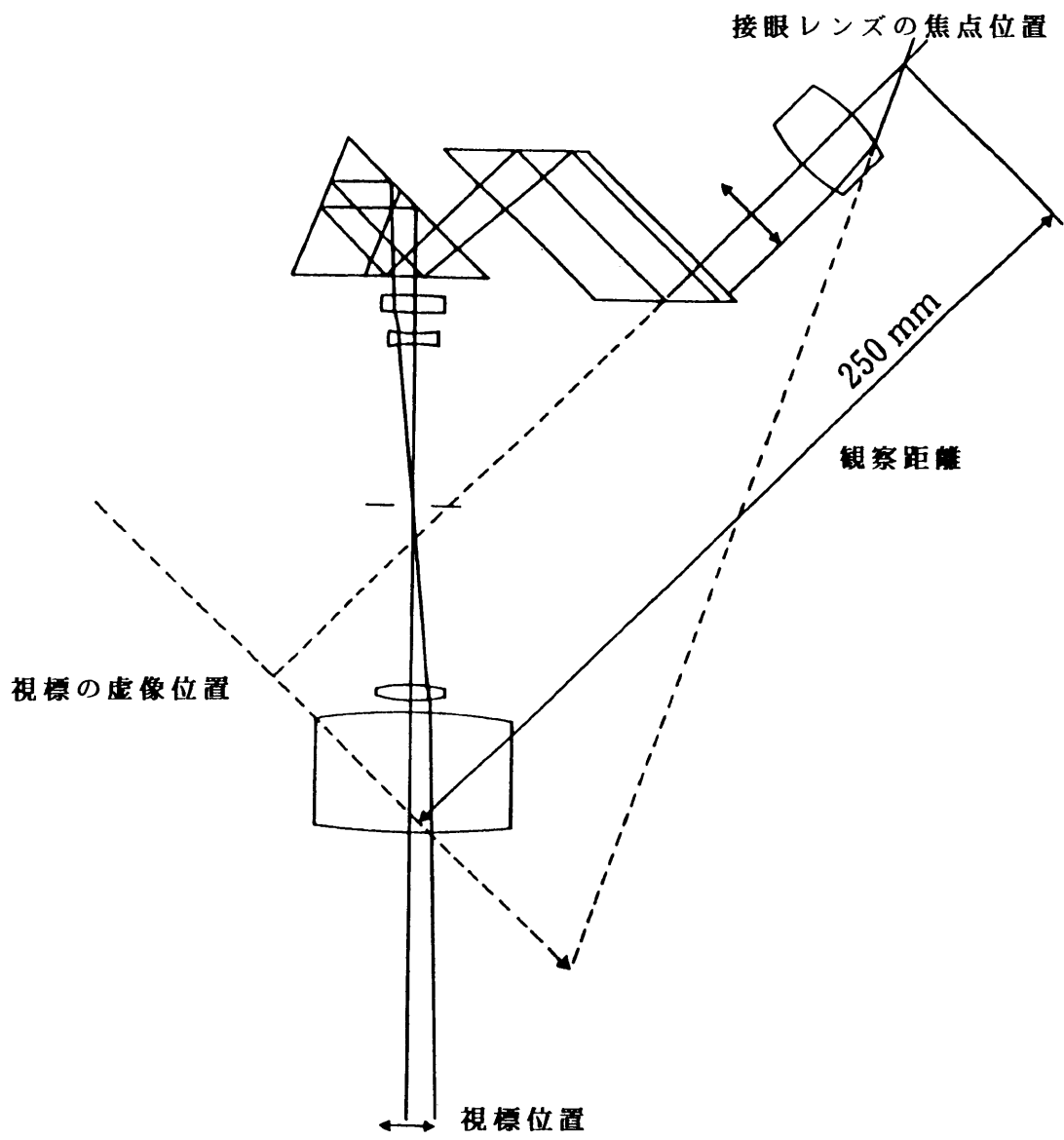


図 2 - 3 観察距離の算出

この時の視野内での2視標間の横ズレ量： $\Delta$ は、

$$\begin{aligned}\Delta &= f_3 \times \alpha \\ &= f_2 \cdot h \cdot x / (f_1^2 + f_1 \cdot x)\end{aligned}$$

となる。

図2-4にあてはめると、比較視標の奥行量（光軸方向距離）を $X=0.1\text{mm}$ とし、それぞれの焦点距離を $f_1=100\text{mm}$ ,  $f_2=100\text{mm}$ ,  $f_3=25\text{mm}$ とし、左右光軸間距離 $h=11\text{mm}$ とした場合の両眼視差角（ $2\alpha_3$ ）は、180秒となる。

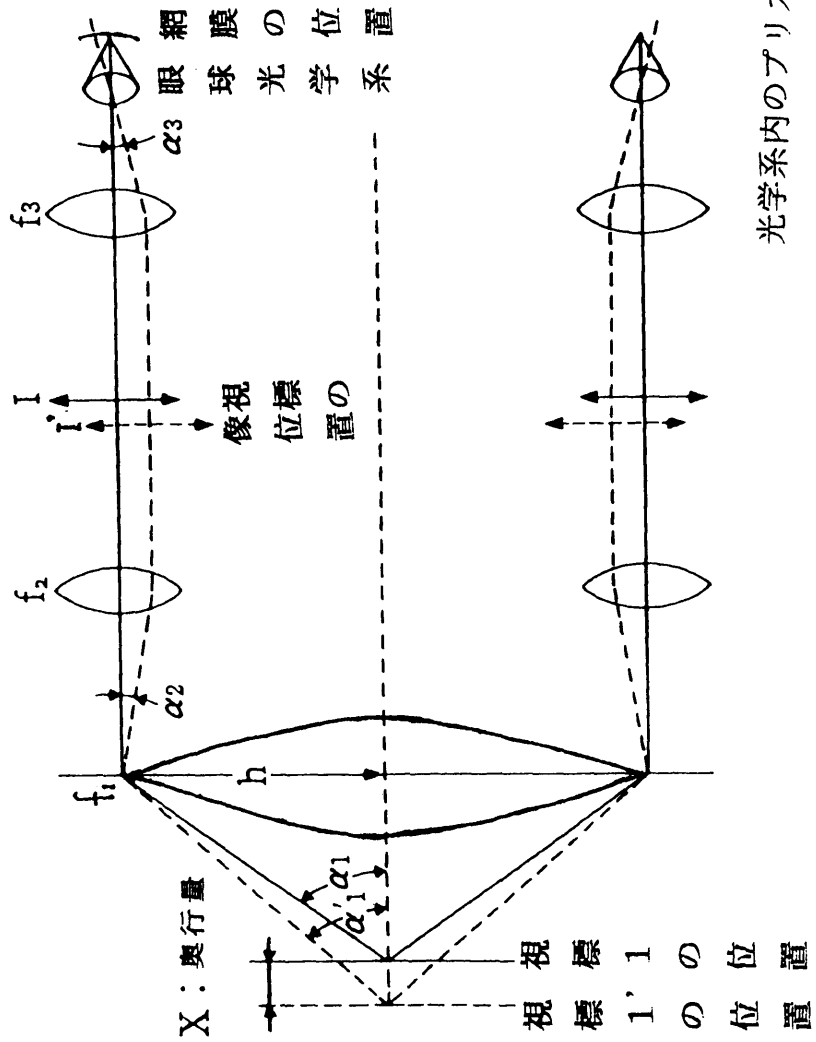
### (1) 実験1-1（形情報がある場合の奥行弁別実験）

図2-5のとおり、視標には視認性の高いパターンとして円と正方形(調, 1981)の2つを用いた。また、この時2種の視標の輪郭線長はともに12mmと等しく設定した。視標面は高精度に加工（厚さの均一性、端面加工精度、輪郭線のシャープさなど）された、材質感の少ない表面粗さの均一な面で、視認性の高いといわれる視標（パターン認識の見地からも視認性が高いという結果が出ている2つの形）の形態を使用した。

そして、同一形態のパターン視標間による奥行と、2種類形態のパターン混在視標による2視標間の奥行、ならびに3視標間に於ける奥行知覚の相対比較実験を行った。奥行量は視野内に一定の間隔を保った視標を配置し、視標間に板厚の精度が管理されている無色の硝子を組み合わせ、はさむことで視標の位置と奥行量の調整を行った（図2-6）。

視差角による奥行量は、14, 27, 41, 54, 91, 181, 272秒に設定した。また、この時の視標の厚さは数ミクロンであった。そして視標の色はクロム系の黒色とした。

実験条件は、前述のほかに顕微鏡の総合拡大倍率10倍、視標の配置方法はランダム配置として事前に決定しておいた。



光学系内のプリズムは省略

図 2 - 4 両眼視差角

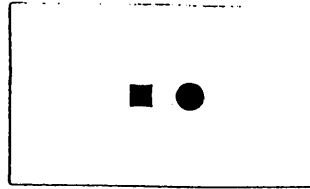


図 2 — 5 2つの視標による奥行比較実験の視標

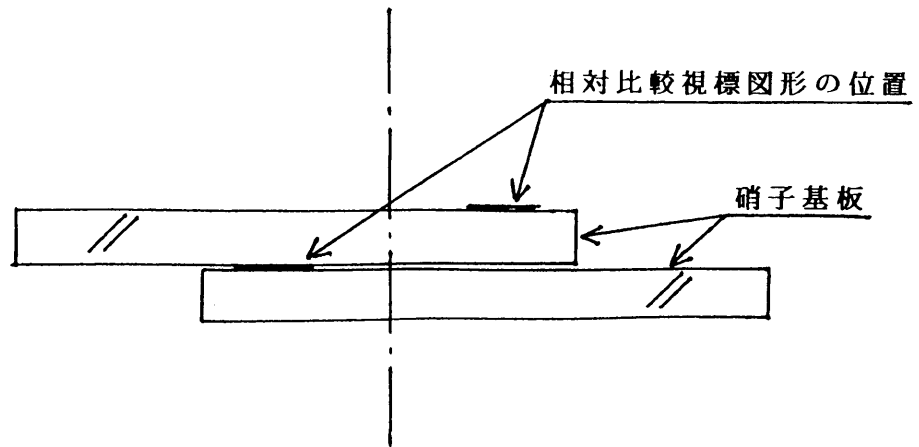


図 2 — 6 2つの視標による奥行比較実験の視標断面図

## (2) 実験1-2 (輪郭線情報がある場合の奥行弁別実験)

スリ傷のきわめて少ないブロックゲージを用いて、2視標間での奥行量の弁別について、実験1-1と同様に相対比較実験を行った (Östberg and Swanson 1988)。

実験は、視標面を拡大して、視野内に両視標の各1本のエッジと平面部が観察可能な状態をつくって行った。このとき2視標の各1本ずつのエッジ (形状や厚さに関する輪郭線情報) は、視野中央部に縦方向に観察できるようにセットした。

この時に、照明ムラや陰影などが生じないように照明系の配置と光量に注意をはらった。

視差角による奥行量は、14, 27, 41, 54, 82, 109, 136, 272秒に設定した。

実験条件は、前述のほかに顕微鏡の総合拡大倍率10倍、視標の配置方法はランダム配置として事前に決定しておいた。

## (3) 実験1-3 (輪郭線情報をなくして視標面のテクスチャ情報のみによる奥行弁別実験)

実験1-2と同じ方法で、さらに視標面の輪郭線を覆い隠して視標の面のみが観察可能な状態をつくり、また照明ムラや陰影などが生じないように照明系の配置と光量に注意をはらって実験を行った。

視差角による奥行量は、41, 54, 82, 109, 136, 272秒に設定した。この時の実験条件は、前述のほかに顕微鏡の総合拡大倍率10倍、視標の配置方法はランダム配置として事前に決定しておいた。

### 2.2.2 実験条件

実験条件は、顕微鏡総合拡大倍率10倍、観察距離（仮想像面までの距離）は、明視の距離250mm、両眼輻輳角12.6度、両眼回旋点間距離（眼幅調整後）22mmとなるように光学系を設定した。被験者としては、各種の視覚異常(山本, 1981; 仁田, 1990) [眼位（カバーテスト法）、立体視（テストチャート法）、調節機能（視標移動式調節力検査法）] のないことを確認済みの男子8名（平均年齢30歳、23～43歳）を用いた。

また、相対比較実験を行う環境として、照度による瞳孔調節への影響を排除する目的から、常に安定した照明光（視標の見えを一定に保ち、明度、照度、照明角度を一定に保った）を得るために暗室を使用し、照明方法は、同軸落射照明とリングファイバー照明を併用することで、シャドウやテクスチャ（明暗勾配やキメの勾配）による奥行弁別に於ける影響因子を統制した（Marr, 1982 ; 池田, 1988）。

観察時間は10秒以内とし、実験間隔を2～3分とすることで、「継時的なコントラスト効果」（残効）などの影響も排除して実験を行った(Ogle, 1958 , 1962)。

提示する視標については、2つないし3つの視標がそれぞれ同時かつ十分に深い焦点深度を確保すべく配慮し、視標をレイアウトした(宮代ほか, 1989)。すなわち、各視標間隔の設定のほか、観察装置の被写界深度についても十分に余裕を持たせた焦点深度を視野全体に常に確保できる状態を作った。

## 2. 3 結果と考察

実験1-1の結果、形情報がある場合の奥行知覚は、図2-7の3視標の奥行弁別率ならびに同錯視率の高まり傾向から判断して、視差角41秒近傍に奥行弁別閾値があることが確認された。

図に於ける単一視標の場合と2視標、3視標それぞれの場合と比較した場合、錯視率を考慮した場合には、視認性の高い形による複数視標配置の場合の奥行量の相対比較実験の結果には際立った弁別傾向の差異は見受けられなかった。

この時の、錯視率と弁別率は、視認性が良い場合に得られる弁別率の傾向曲線を示しており、弁別閾値を過ぎた弁別不能領域に於ける弁別率の急速な低下曲線傾向からも視認性の高い視標の観察結果であることが裏づけられている。この事からも、奥行弁別率の低下傾向を示す曲線と錯視率の上昇傾向を示す曲線が、視認性の評価基準のひとつとして活用できることが考察された。

次に、実験1-2の結果は、視差角で54秒近傍に奥行弁別閾値があることが確認された(表2-1)。

実験1-1の結果より閾値が高くなった原因としては、輪郭線の加工精度の差が奥行の手がかりの差になっていることが考えられる。輪郭線が乱れた視認性が悪い場合についての補足実験でも同様の結果が得られたことから、視標端面すなわちエッジの面取り加工精度が悪い場合には、錯視因子となって閾値を上昇させているものと推察する。

視標の配置については、過去の研究(磯, 1986; 舘, 1981)から縦方向に配置した2刺激対象よりも横方向に配置した方が、パターン認識の観点から、また視認性のうえからも感度の高い結果が得られているが、今回の結果では縦方向にエッジ線を配置したほうが弁別に費やす時間が短いこと(縦方向  $5.3 \pm 1.3$  秒に対し、横方向  $7.4 \pm 1.4$  秒)や、表2-1のように優れた奥行弁別結果が得られた。

輪郭線情報としては、視認性の悪い縦方向に走る左右に並行な2本のエッジ線

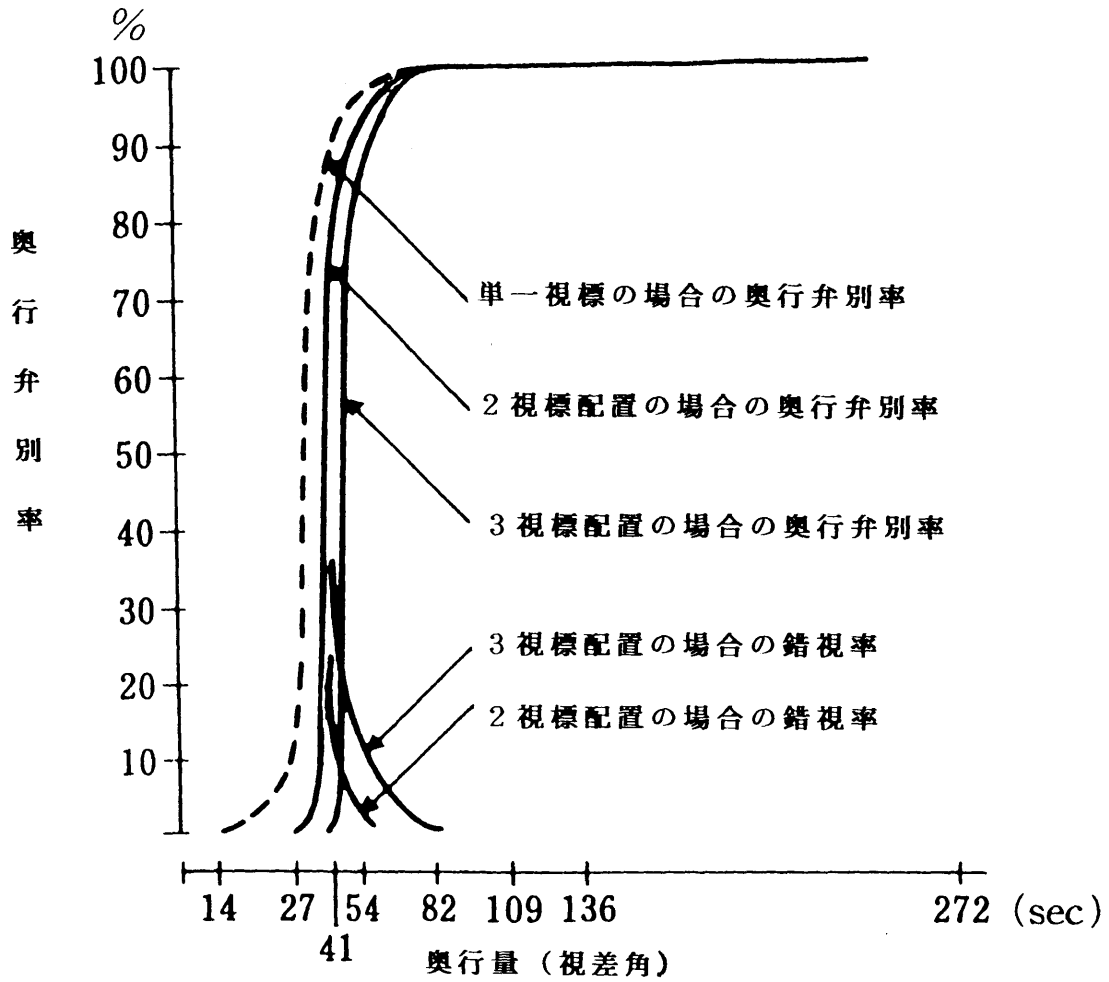


図 2-7 視認性の高い形による複数視標配置の場合の奥行量の相対比較



表2-1 輪郭線情報がある場合の奥行弁別閾(n=8)

視 差 角	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)
4分32秒	100	0	100	0
2分16秒	100	0	100	0
1分49秒	100	0	100	0
1分22秒	100	0	100	0
54秒	75(1)	13	88	12
41秒	38(2)	38	63	37
27秒	0(8)	0	100	0
14秒	0(8)	0	100	0

全回答における誤答率： $4/64=6\%$

カッコ内は弁別不能と回答した人数

正答率=正答数/回答数(正答数は弁別不能を含む)

表2-2 輪郭線情報がなくテクスチャ情報だけの場合の奥行弁別閾(n=8)

視 差 角	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)
4分32秒	100	0	100	0
2分16秒	75	25	75	25
1分49秒	38(1)	50	50	50
1分22秒	25(1)	63	38	62
54秒	75(1)	13	88	12
41秒	0(8)	0	100	0

全回答における誤答率： $12/48=25\%$

カッコ内は弁別不能と回答した人数

自体を基準に、相対比較を行っていることが考えられる(Schmidt, 1980)。

しかし、実験の結果からは、視認性の悪い輪郭線の配置方向でも輪郭線（形状や厚さ）が高精度に加工された視標のほうが高い弁別結果が得られていることから、視認性としては配置方向による影響よりも視標パターンの加工精度の方が、より影響度の大きな影響因子となっていることが考察された。

実験1-3の結果、視差角2分16秒近傍に奥行弁別閾値が存在することが明らかとなった（表2-2）。輪郭線（エッジ）情報のある場合には、ない場合と比較して視差角で82秒と弁別閾値が低下し、視認性が高まった。

この奥行弁別閾値に関する実験では、輪郭線情報が存在することで、閾値が低下するだけでなく、識別時間も輪郭線がある場合は  $5.4 \pm 1.0$  秒、ない場合  $7.2 \pm 1.2$  秒と、25%ほど短時間であったことから、輪郭線（エッジ）情報が奥行知覚の認識、すなわち弁別閾値を低下させるほかに、視認性をも高めるなど、有効な刺激情報であることが確認された。

## 2. 4 結論

奥行知覚の認知機能のうち、両眼視差による奥行量の弁別実験を行い、奥行知覚の視認性を高める因子である形、輪郭線についての特性を検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 視認性の高い形の場合には、形の差や配置方法による奥行弁別への影響は認められなかった。また、奥行弁別閾が両眼視差角41秒近傍にあることが確認された。
- (2) 輪郭線は、視標作成時にエッジ（端面）の機械的な加工精度を高めることで視認性が高まることが確認された。

視覚機能に関わる特性を論ずるには、生体機能が有する補完機能を前提としたシステムを十分に考慮して論ずるべきものと考え。すなわち、奥行知覚の弁別作業における視認性や錯視について考える場合には、事前に当該システムを構成する因子の影響度を定量的・定性的に分析しておく必要がある。

### 第3章 奥行弁別作業に於ける錯視要因と学習効果について

#### 3.1 緒言

人間の視覚認知機能を工学的に再現しようとする試みや、視覚による形態と質感の認識や判別の機能である人間の3次元空間認識特性についての研究が、様々な観点からさかんに行われている。ここでは、質感認知あるいは立体視という観点からの研究結果を報告する。すなわち、視覚処理システムの機能のうち、奥行知覚認知の為の主要因である両眼視差（両眼網膜像差）による判別のための要因として材質感（広義にはテクスチャ）と錯視効果についての研究結果を報告する。

両眼視による奥行知覚は、輻輳により注視点を定めた後に、両眼視差によって正確な立体視を得ていると考えられる。また、注視点決定と立体視を得る処理に要する時間は瞬時であり、その機能の働く順序もほぼ同時と考えられている。

両眼視差による知覚要因とその特性としては、パターン認識、地の輪郭線情報（ここでは疑似的にテクスチャ情報を配したときに背景となる面の輪郭線を意味する）の有無、テクスチャの明暗勾配、観察距離（拡大倍率）、奥行対比効果、照度などがあげられる。特にここでは、視認性の要因のうち類似特性を生じ易い因子についての実験をとおしてその機能を探ってみた。すなわち、運動視差を排除した視認性の高い方法によって実験計画を組み、微細領域における実験をとおして、奥行量の弁別閾とそのとき視標面に生ずる材質感とそのテクスチャ刺激量による錯視効果についての研究と、奥行弁別と習熟効果に関する研究を行った。

## 3. 2 研究方法

### 3.2.1 実験方法

実験には、第2章の視認性の実験と同様に左右独立した光学系を有する実体顕微鏡を用い、視標を固定し、頭運動を統制する事で運動視差の要因を排除した。

実験装置の原理ならびに構成は、第2章 2.2.1を参照戴きたい。そして、第2章の視認性の実験で確認された要因とその効果を踏まえて、安定した再現性、視認性などの実験条件を設定した後、両眼視差要因に限った奥行知覚の弁別関に於ける錯視要因に関する実験を行った。

#### (1) 実験2-1 (テクスチャ情報の刺激程度と奥行知覚認知への影響についての実験-1)

実験1-3と同じ視標観察方法で、更に視標面に傷をつけて疑似的にテクスチャを生じさせた。テクスチャの刺激程度とその影響についての実験を行った。

このとき、テクスチャ刺激量は奥行量より大きいか、等しくした。また、視差角による奥行量は、41, 54, 82, 109, 136, 272秒に設定した。顕微鏡の総合拡大倍率は10倍に設定した。また、視標面上のテクスチャ刺激値は傷の凹凸の最大値で規制し、その値以下の大きさの刺激値が混在している状態とした。傷は、打痕、引掻によるもので、緩やかな曲線形状のものとした。

#### (2) 実験2-2 (視標面にキメの勾配をつけた場合と、照明角度を利用した明暗勾配をつけた場合の実験)

実験2-1と同様であるが、疑似テクスチャの大きさを選別し配置する方法と、ファイバー照明を使って視標面に明暗の差を生じさせる方法によって視標を作成した。視差角による奥行量は、実験2-1と同様に設定した。また顕微鏡の総合拡大倍率は10倍に設定した。

### (3) 実験2-3 (テクスチャ情報の刺激程度と奥行知覚認知への影響についての実験-2)

それぞれの直径がほぼ同じ球形の粒子で、球の表面に非常に微細なテクスチャをつけた視認性の高い粒子を地に1層しきつめた視標を使ってテクスチャの程度とその影響についての実験を行った。この粒子は、奥行量の差よりも「大きい、等しい、小さい」3種を準備した(図3-1)。また、実験は熟練者と非熟練者に分けて行った。

なお、輪郭線の覆い方は図3-2ならびに図3-3のとおり、材量の質感や勾配(キメの勾配とマスキング部分や隣接する疑似テクスチャ部分の傾き)の影響がでないように特に注意をはらい、光学系の焦点深度内にシール部分の焦点が合わないよう工夫して配置してエッジ部分を覆い隠す方法をとった。

#### 3.2.2 実験条件

実験条件は、顕微鏡総合拡大倍率10倍、観察距離(仮想像面までの距離)は、明視の距離250mm、両眼輻輳角12.6度、両眼回旋点間距離(眼幅調整後)22mmとなるように光学系を設定した。被験者としては、各種の視覚異常(山本, 1981; 土田, 1990) [眼位(カバーテスト法)、立体視(テストチャート法)、調節機能(視標移動式調節力検査法)]のないことを確認済みの男子18名を起用した。

実験2-1から実験2-2までは8名の被験者グループ(平均年齢30歳、23~43歳)である。また、実験2-3は、顕微鏡作業の経験年数3年以上で、前述の視覚機能の優れている熟練者グループ(平均年齢28.8歳、24~35歳)8名と、同作業の経験が2ヵ月以下で顕微鏡作業経験がほとんどない非熟練者グループ(但し、双眼視で融像ができることを確認済みの平均年齢31歳、23~42歳)10名の2グループに分けて比較実験を行った。

実体顕微鏡作業は、他の顕微鏡作業と比べて使いこなすことが難しい機器であ

視標 = ①, ②, ③      ① < d  
 視標間奥行量 = d      ② = d  
                                  ③ > d

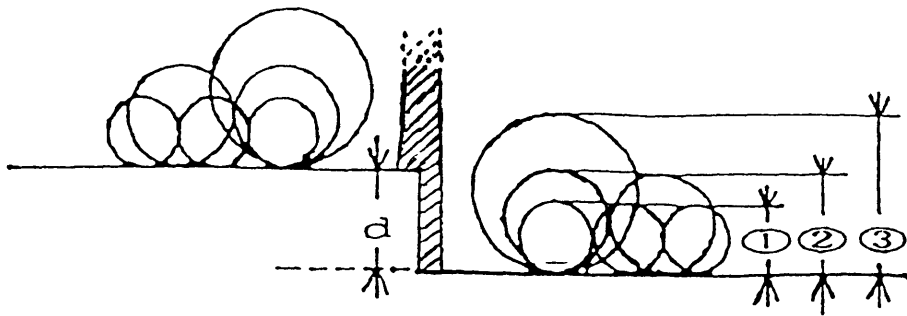


図 3 — 1 テクスチャ視標の断面図

図 3 — 2 テクスチャのついた奥行観察視標

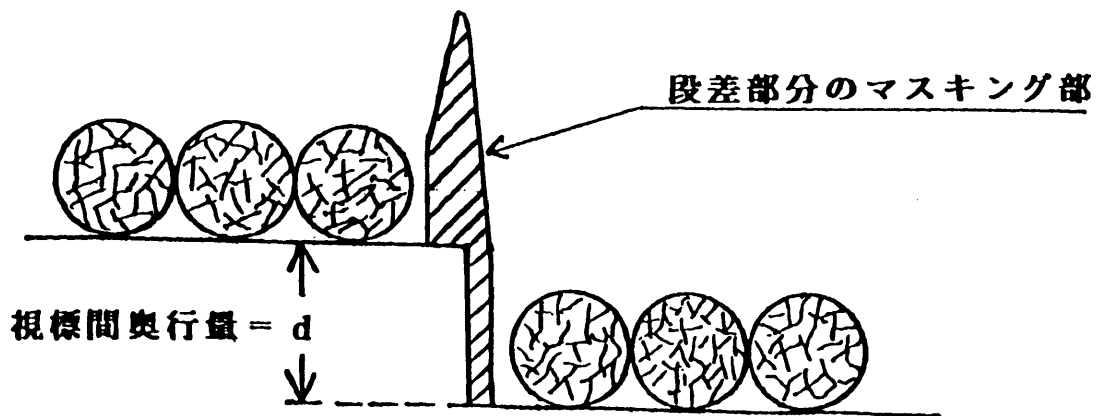
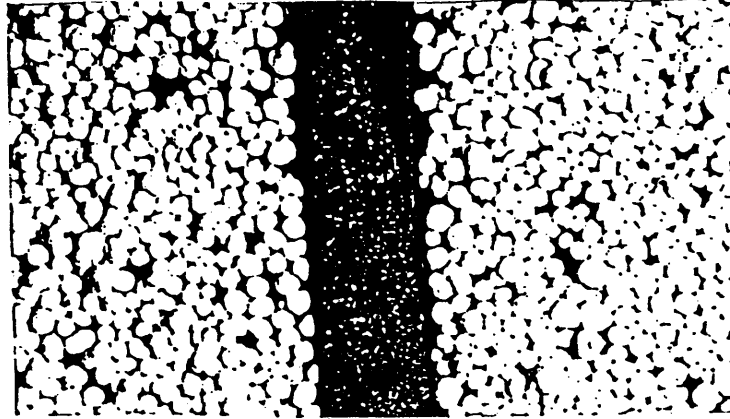


図 3 — 3 テクスチャのついた奥行観察視標 (断面図)



る。そして、熟練するに要する期間も長く、一般的には3～6週間で基本操作や基本作業を他の顕微鏡同様に習得できると云われているが、熟練に要する期間は最低1年以上、できれば2年以上の作業経験を積んでいる人と定義づけることが適当と云われる。今回の実験では更に余裕を持たせて3年以上の経験者で常時顕微鏡作業に関わっている者を起用した。また、その作業に於ける熟練の定義は難しいが、今回の実験に於いては目視による検査部門で被験物の傷や欠陥についての目視による官能検査の経験年数が3年以上の者とした。

被験者として起用した熟練者の技量としては、顕微鏡観察に於ける目視観察に於ける傷等の測長精度が非常に高い者達であった。非熟練者は逆に測長等の差異弁別は困難ないし難渋する者達であった。

また、非熟練者には前述の眼科的疾患の有無と両眼融像視ができることを確認できた者を起用した。そして、非熟練者グループの実験結果の集計については、データの最高値と最低値は切り捨て被験者は8名とした。

実験の環境およびその他の実験条件は第2章の視認性の実験1と同様である。

### 3. 3 結果と考察

奥行弁別は、 $\text{試行弁別率 (\%)} = \text{弁別できた回数} \div \text{試行回数} \times 100$

$\text{正答率 (\%)} = (\text{正答数} + \text{弁別不能数}) / (\text{総試行回数}) \times 100$

で表現した。

尚、当章に於ける弁別率ならびに弁別不能率とは、特にことわりの無い限りは試行弁別率を示す。また奥行弁別閾は弁別率70%とした。

閾値については、どこで切るか議論のあるところであるが、前述のとおり70%とした。熟練者に限った弁別の場合には、錯視の影響程度を勘案すると錯視率10～15%を弁別閾値と捉えるのが適当かと考える。また、非熟練者の場合には更に誤答率を加えて判断すべきとも考える。すなわち非熟練者の回答には、非作為的

だが確率  $1/2$  の正答確率的因子が存在する場合が含まれ、被験者を増やしても閾値が収束したり精度が高まるとは考え難い。実験データの信頼性を評価する一つの尺度としては、図に於ける弁別率が50%近傍から急速に0%へ落ちるカーブが注目される。このデータには”回答確率”の影響は少なく”弁別不能の回答”とともに、高い回答精度がうかがえるものである。

実験2-1の結果、視標間の奥行量と同じか、奥行量以上にテクスチャ刺激量（視標面の傷）が大きい場合には、奥行弁別閾値は2分16秒近傍に存在し、錯視を生じやすいことが明らかとなった（表3-1）。ただし、刺激量と奥行量とが等しい場合には、実験結果の再現性は不安定なものであった。

実験2-2の結果、キメの勾配や照明角度をつけなかった場合と比べ、テクスチャ刺激の程度が弱くても奥行弁別についての錯視を生じやすくなり、得られた結果もデータの繰り返し再現性も乏しかった。

これらの要因については、刺激程度と効果の程度に関する詳細な実験が今後必要と考える。

実験2-3に於ける実験①～⑤の結果については、熟練者のデータを示し、非熟練者のデータは（ ）内に示して記述する。

実験①：輪郭線情報を含んだ、テクスチャのきわめて少ない地の情報だけの場合。

（テクスチャの大きさは視標間の奥行量の $1/10 \sim 1/50$ とした場合）

非熟練者は、弁別閾値近傍で錯視率が50%近くまで急速に高まり、識別しているとは言い難い結果であった。これに対して、熟練者は閾値近傍に於いても錯視率は12%程度に留まって安定した弁別結果が得られた。

実験の結果は、奥行弁別閾値は視差角41秒（54秒）近傍にあることが明らかとなった（表3-2①および図3-4①）。また、視差角41秒のときの錯視率は12%（50%）、奥行弁別率は88%（50%）であった。視差角27秒で試行を行った結

表 3 — 1 テクスチャ情報の刺激程度と奥行弁別閾 (n = 8)

奥行量 ≤ テクスチャ刺激量の場合

視 差 角	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)
4 分 32 秒	100	0	100	0
2 分 16 秒	75	25	75	25
1 分 49 秒	25	75	25	75
1 分 22 秒	0(8)	0	100	0
54 秒	0(8)	0	100	0

全回答における誤答率：8/40 = 20 %

カッコ内は弁別不能と回答した人数

正答率 = 正答数 / 回答数 (正答数は弁別不能を含む)

表3-2 テクスチャの刺激程度の比較と奥行弁別閾値

実験①：輪郭線情報を含むテクスチャのきわめて少ない場合

視 差 角	熟練者 (n=8)				非熟練者 (n=8)			
	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)
4分32秒	100	0	100	0	100	0	100	0
2分16秒	100	0	100	0	100	0	100	0
1分49秒	100	0	100	0	100	0	100	0
1分22秒	100	0	100	0	100	0	100	0
54秒	100	0	100	0	100	0	100	0
41秒	88	12	88	12	50	50	50	50
27秒	13(6)	13	88	12	0(4)	50	50	50
14秒	0(2)	0	100	0	0(4)	0	100	0

全回答における誤答率：熟練者 2/58=3%，非熟練者 8/60=13%

実験②：輪郭線情報を含まないテクスチャのきわめて少ない場合

視 差 角	熟練者 (n=8)				非熟練者 (n=8)			
	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)
4分32秒	100	0	100	0	100	0	100	0
2分16秒	100	0	100	0	100	0	100	0
1分49秒	100	0	100	0	100	0	100	0
1分22秒	100	0	100	0	88	12	88	12
54秒	88	12	88	12	38(1)	50	50	50
41秒	13(4)	38	63	37	0(6)	14	86	14
27秒	0(4)	0	50	0				

全回答における誤答率：熟練者 4/56=7%，非熟練者 6/48=13%

実験③：輪郭線情報を含まない場合(テクスチャ刺激<視標間奥行量)

視 差 角	熟練者 (n=8)				非熟練者 (n=8)			
	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)
4分32秒	100	0	100	0	100	0	100	0
2分16秒	100	0	100	0	100	0	100	0
1分49秒	75	25	75	25	75	25	75	25
1分22秒	63	37	63	37	38	63	38	63
54秒	0(8)	0	100	0	13(7)	0	100	0
41秒					0(1)	0	100	0

全回答における誤答率：熟練者 5/40=13%，非熟練者 7/41=17%

表3-2 (つづき)

実験④：輪郭線情報を含まない場合(テクスチャ刺激=視標間奥行量)

視 差 角	熟練者 (n=8)				非熟練者 (n=8)			
	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)
4分32秒	100	0	100	0	100	0	100	0
2分16秒	100	0	100	0	75	25	75	25
1分49秒	75(1)	13	88	13	75	25	75	25
1分22秒	50(1)	25	63	25	38(1)	50	50	50
54秒	0(6)	0	100	0	0(6)	14	86	14
41秒					0(1)	0	14	0

全回答における誤答率：熟練者 3/38=8%，非熟練者 9/40=23%

実験⑤：輪郭線情報を含まない場合(テクスチャ刺激>視標間奥行量)

視 差 角	熟練者 (n=8)				非熟練者 (n=8)			
	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)	弁別率(%)	錯視率(%)	正答率(%)	誤答率(%)
4分32秒	100	0	100	0	100	0	100	0
2分16秒	75	25	75	25	75	25	75	25
1分49秒	63	37	63	37	63(1)	25	75	25
1分22秒	0(8)	0	100	0	0(4)	50	50	50
54秒					0(4)	0	100	0

全回答における誤答率：熟練者 5/32=16%，非熟練者 8/36=22%

カッコ内は弁別不能と回答した人数

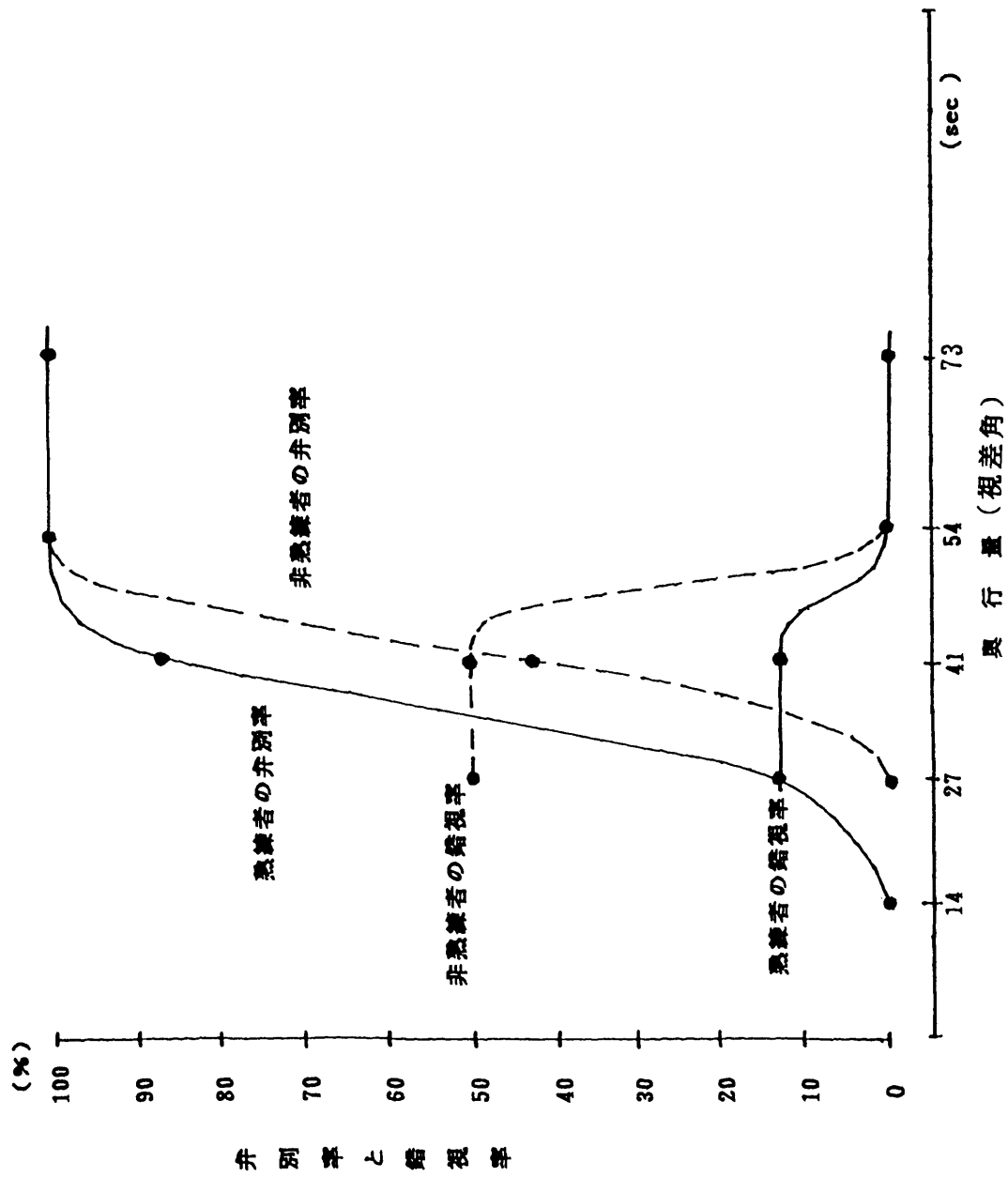


図3-4 テクスチャの刺激程度の比較と奥行弁別閾値  
①輪郭線情報を含んだテクスチャ刺激量の極めて少ない場合

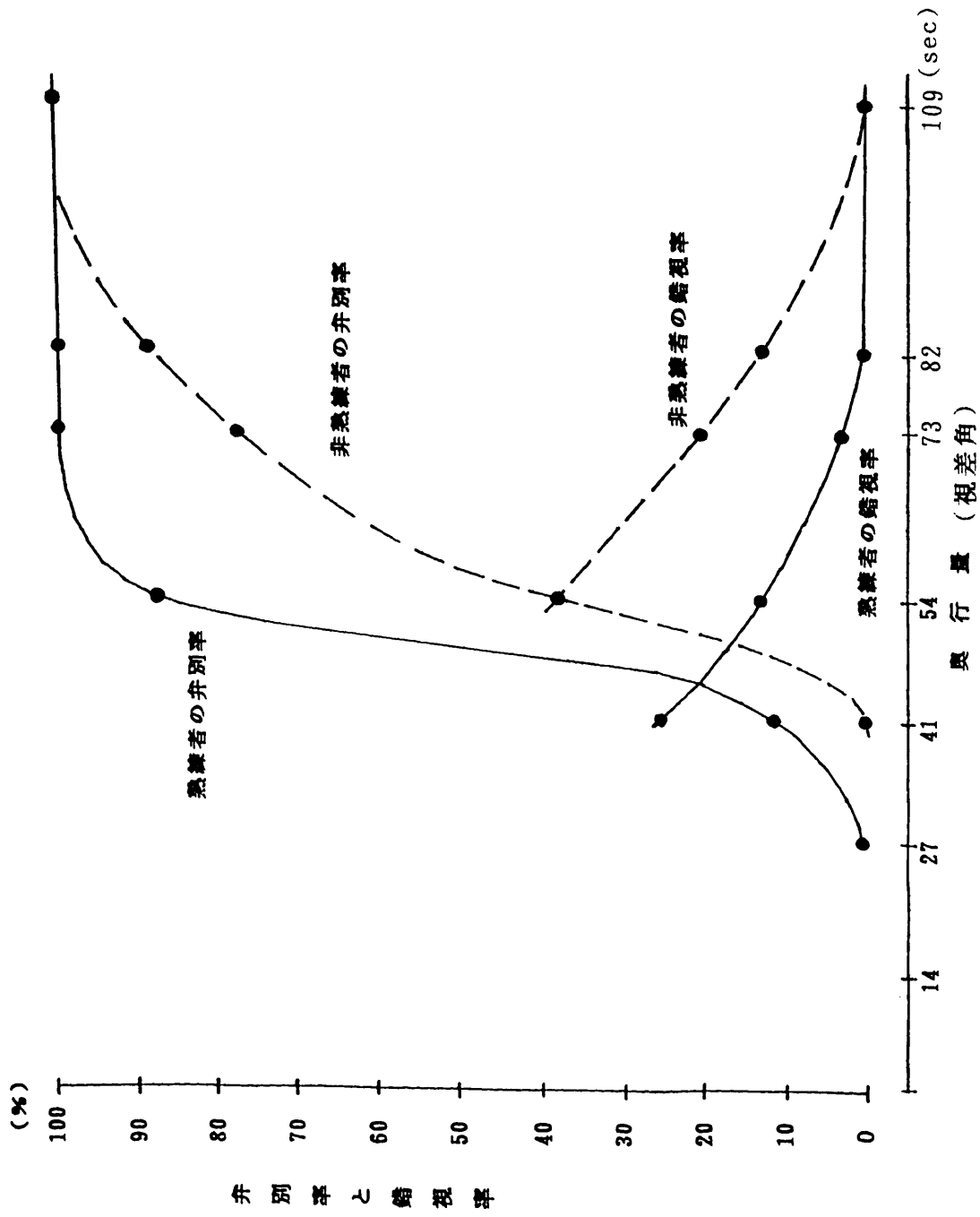


図3-4 テクスチャの刺激程度の比較と興行弁別関値

②輪郭線情報を含まないテクスチャ刺激量の極めて少ない場合

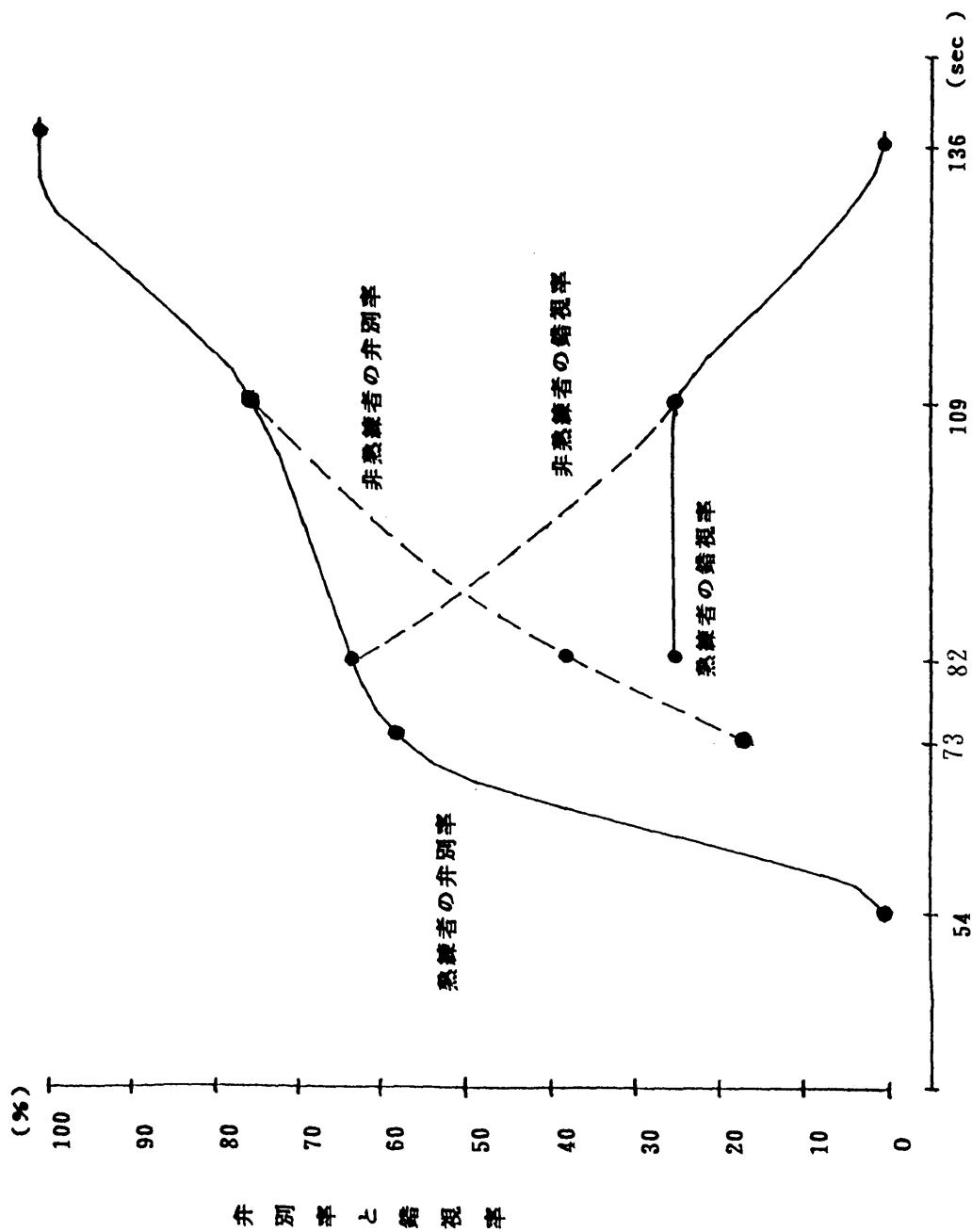


図3-4 テクスチャの刺激程度の比較と興行弁別閾値

③輪郭線情報を含まない

(テクスチャ刺激量) < (視標間興行量の差) の場合



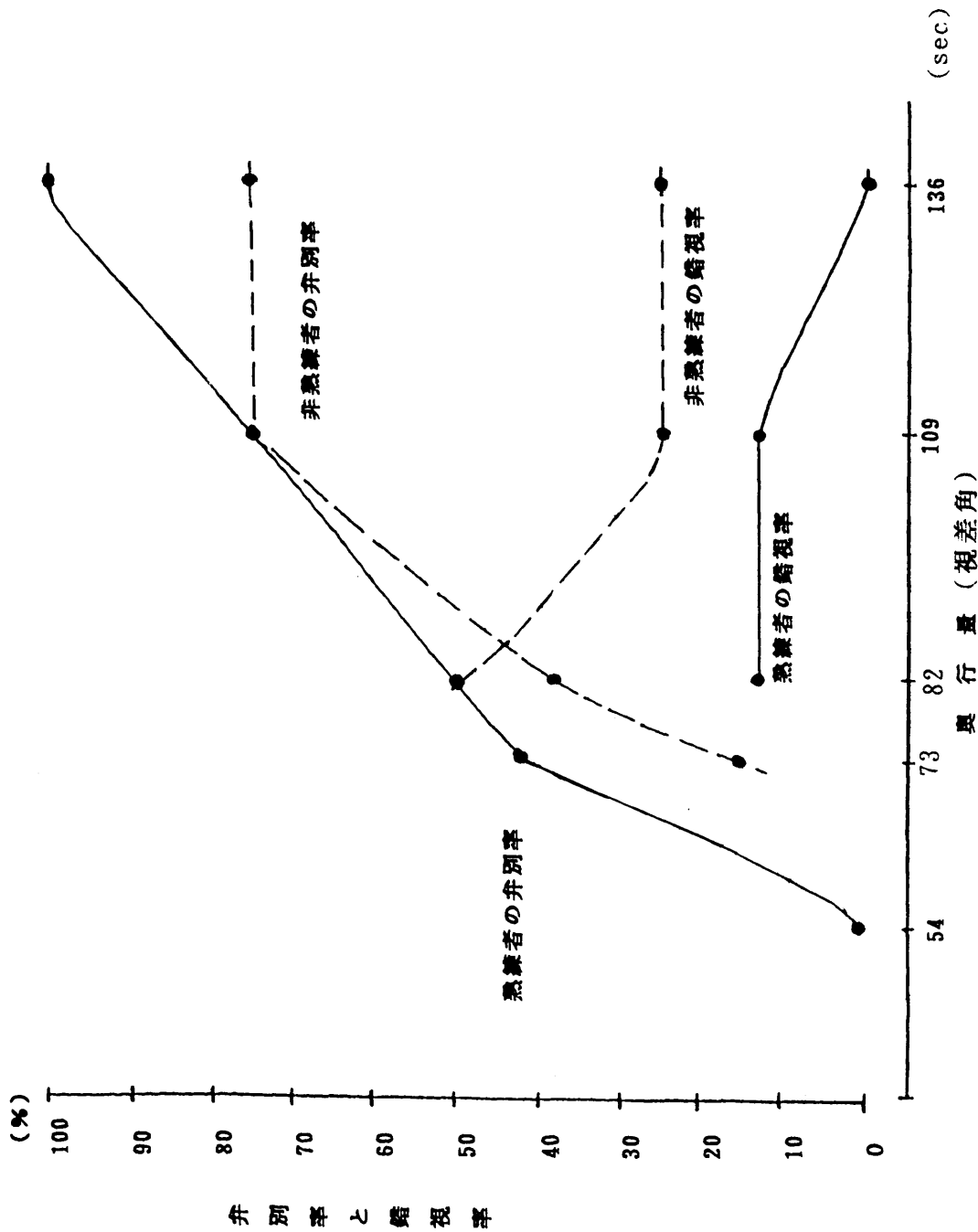


図3-4 テクスチャの刺激程度の比較と奥行弁別閾値

④輪郭線情報を含まない

(テクスチャ刺激量) = (視標間奥行量の差) の場合

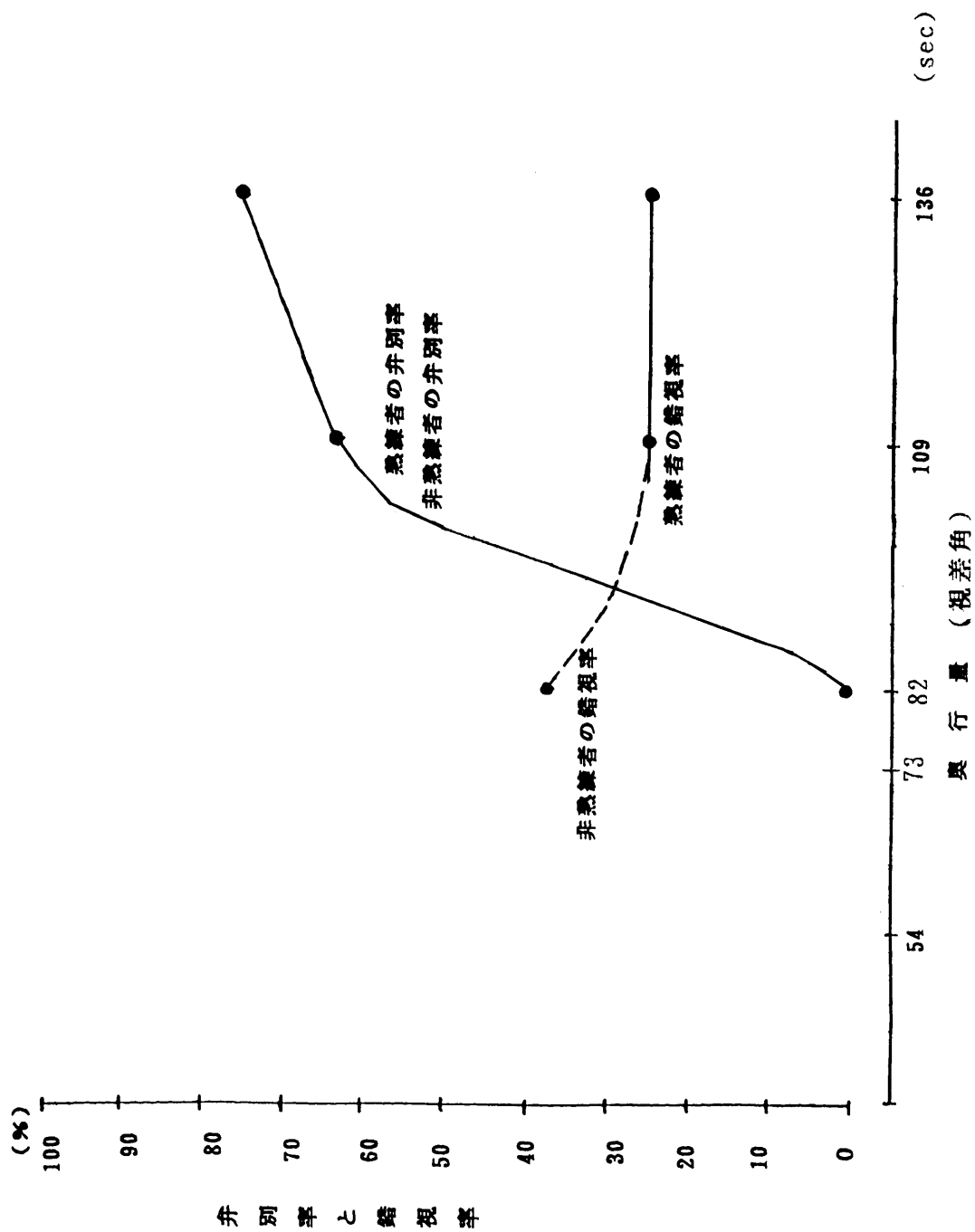


図3-4 テクスチャの刺激程度の比較と奥行弁別閾値

⑤輪郭線情報を含まない

(テクスチャ刺激量) > (視標間奥行量の差) の場合

果では、錯視率13%(50%)、奥行弁別率13%(0%)であった。

すなわち、視認性の実験結果をふまえた実験条件を設定した結果、弁別閾値は低下した。また、熟練者と非熟練者との間には奥行弁別閾、錯視率ともに明らかな差異が認められた。特に弁別閾近傍に於ける錯視率は、非熟練者の誤答率が高く、その差が顕著であった。

**実験②：**輪郭線情報を含まない、テクスチャのきわめて少ない

(地の情報だけの) 場合。

図3-4 ②は①の輪郭線を含む場合と比較して明らかな差異が認められた。

すなわち、非熟練者の視差角の減少に伴う早い時期からの弁別率の低下と、錯視率の上昇傾向から識別し難い視標であることが推察された。

奥行弁別閾値は視差角54秒(1分22秒) 近傍にあることが実験により明らかになった(表3-2 ②ならびに図3-4 ②)。輪郭線情報がないことで、閾値は実験①よりも高くなった。

また、視差角41秒(54秒)の時の錯視率は38%(50%)、奥行弁別率は13%(38%)であった。

**実験③：**輪郭線情報を含まないテクスチャ刺激量<視標間奥行量の差

**実験④：**輪郭線情報を含まないテクスチャ刺激量=視標間奥行量の差

**実験⑤：**輪郭線情報を含まないテクスチャ刺激量>視標間奥行量の差

実験③～⑤の結果は表3-2 ③～⑤ならびに図3-4 ③～⑤に示すとおりである。

実験③の結果から、図3-4 ③の熟練者の弁別率にみられるとおり、変曲点の存在が確認された。熟練者の弁別率に変曲点が存在するのは、視標の観察方法の変化が存在するためと考察した。

すなわち、注視方法を変化させることで、弁別能力を高めていることが推察される。また、この時の錯視率が他の一連の実験結果と同様に熟練者特有の横ばい傾向に移行していることから、弁別閾近傍に達したことを推察させる。

実験後の聞き取り調査結果からも、具体的な注視方法を、

(1)テクスチャの部分情報で判断している場合、

(2)地やテクスチャの集群で判断している場合、

(3)部分情報と集群で判断している場合、

に大別した場合、熟練者の場合には視認性が高い場合は(1)で、低くなると(2)で判断していることが、また、非熟練者の場合には、(1)~(3)のいずれかの方法だけで判断していることが明らかとなった。

熟練者の実験結果から、視標の持つテクスチャ情報（特に集群情報）が適度の大きさの場合には、奥行弁別の補助的手段として活用されていることが明らかとなった。そして表3-2③から視差角1分49秒近傍に閾値があり、実験②に比べて2倍ほど閾値が上昇したことが明らかとなった。

実験④：奥行弁別率について、実験③と④はほぼ同様の傾向を示した。

しかし、実験④に於ける非熟練者の錯視率は熟練者に比べ視差角が大きいうちから高い値を示し、熟練者の錯視率は逆に低い傾向を示した。すなわち実験③と④に於ける錯視率による比較では異なる傾向を示した。

非熟練者の錯視率が高まるのは、回答の正答確率（1/2）的な要素が入ってきているためと推察する。これに対して熟練者の錯視率が、弁別閾値に達しても高まらないのは、“弁別不能＝錯視”にはならないことの表れと推察する。その理由としては集群情報による観察方法に切り換えたことによって錯視を防いでいることが考えられる。

実験④のテクスチャと視標間の奥行量が等しい場合には、実験③のテクスチャが視標間奥行量の差より小さい場合に比べて、観察方法を切り替えることでも、

弁別を維持することはできず、観察方法の切り換えが有効には機能していないことがうかがえた。すなわち、弁別閾を考える場合には、適度な輪郭線、地の微細なテクスチャ情報が有効な刺激となるが、輪郭線やテクスチャ刺激量の増大に伴って、徐々に錯視因子となって行くことが明らかとなった。

実験④の条件の場合にはテクスチャ情報が弁別率を高めるための情報としては機能しなくなっていることが考察された。

実験⑤：錯視因子となったテクスチャ情報によって、奥行弁別は”人間の眼の奥行の分解能の限界値：0.5分程度”を大幅に上回る4分前後まで低下させ、熟練者と非熟練者の間で明確な弁別閾値の差異は認められなかった。

そして、不安定な錯視効果により再現性も低下して、”弁別不能”の回答よりも”誤答”すなわち錯視が増加した。

錯視率を誤認率ととらえた場合、表3-2実験⑤のとおり視標間奥行量がテクスチャ刺激量より小さくなると急速に、そして顕著に錯視効果が認められることが明らかとなった。このとき個体差も顕著に認められることも明らかとなった。

熟練者の誤認率はきわめて低く、錯視因子の影響が大きくなると”弁別不能”と回答することで、間接的に錯視効果が表れていることが認められる程度である。

しかし非熟練者の場合には、錯視因子の影響が大きくなると誤答率が高まる傾向を示してた(表3-3)。

熟練者の誤答率の実験結果をみると、弁別率の結果と同様に、実験④に比べて⑤の錯視率は2倍に増加して視認性が悪いことがうかがえた。

そして、熟練者の場合には錯視効果の影響から視差角1分22秒に於いて弁別不能と全員が回答したのに対して、非熟練者は半分の被験者は弁別不能と回答したが、残り半分の被験者は誤答の回答を行っており、錯視状況下での”意気込み”による回答を行っている事をうかがわせる結果となった。

表 3 - 3 熟練者グループと非熟練者グループの誤答率(%)

錯視率 (誤答率)		熟練者	非熟練者
実験条件			
実験①	輪郭線あり テクスチャ極微	3	13
実験②	輪郭線なし テクスチャ極微	7	13
実験③	輪郭線なし テクスチャ<奥行量	13	17
実験④	輪郭線なし テクスチャ=奥行量	8	23
実験⑤	輪郭線なし テクスチャ>奥行量	16	22

以上の実験結果から、奥行知覚の弁別閾値近傍で誤答率が高まる傾向が明らかになったが、熟練者と、非熟練者とでは、弁別閾値の違いによる差異だけでなく、閾値近傍に於ける誤答に含まれる錯視の存在程度とその影響の受け方にも違いがあることが明らかとなった。

奥行弁別閾値の実験に限っていえば、熟練者の被験者としてのデータの信頼性は高いが、非熟練者の被験者としてのデータの信頼性には難があるといえる。

非熟練者を被験者として用いる場合には、実験の主旨によっては、採否を十分に検討する必要があると考える。

そして、弁別閾値の確認と判定には、錯視率を活用することの有効性が明らかとなった。

### 3. 4 結論

両眼視差による奥行弁別実験を行い、奥行知覚の視認性を安定的に高めた状況下に於ける、テクスチャ刺激と錯視効果に関する研究を行った。そして被験者を、熟練者と非熟練者とに分けて実験を行うことで、錯視と習熟効果に関する検討を加えた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 奥行知覚の弁別に限ったテクスチャの刺激情報は、微細なテクスチャ情報のときには、第2章の視認性要因の実験結果のとおり、視認性を高める効果があるが、テクスチャ刺激が相対比較視標間の奥行量（すなわち地の刺激情報）と等しいかそれ以上になると、急速に錯視効果を高めて、極端に視認性を悪くすることが明らかとなった。

すなわち、適度な大きさと質感を有するテクスチャの存在が、奥行知覚認知に於ける視認性向上要因となっていることが確認された。

(2) 奥行知覚の認知方法は、テクスチャの部分情報から、その集群情報による観察へと切り換えることにより、弁別閾が更に低下する過程が熟練者による実験により明らかとなった。

すなわち、熟練者と非熟練者の奥行知覚の認知過程に於ける観察手法の差異が熟練者の錯視を起し難くしているものと推察された。

(3) 錯視は、実験後の聞き取り調査から熟練者の多くが取っている観察テクニックである、適度な大きさと質感を有するテクスチャを、部分情報として活用したり、集群情報として活用したりする観察方法の切り換えのタイミングや移行方法の習得、すなわち「学習効果」によって大幅にその程度を引き下げられる可能性があることが実験の結果から推察された。

熟練者と非熟練者の相対比較実験の結果、弁別閾近傍で奥行弁別に明らかな差異を示した。

テクスチャ事象は、”ヒトとしての過去の経験や体験情報量の差と、認識度に大きく影響している”と一般には考えられているが、その他に”馴れ”見慣れ”などと云われる習熟・訓練の効果が想像していた以上に大きく影響していることが実験により明らかとなった。

そして、視標の持つ材質感すなわちテクスチャの大きさの程度と観察者の視標観察の方法や経験訓練の度合いによって、錯視の程度や生じ方が異なることが実験により確認された。

また、錯視のメカニズムを考えるにあたって、単眼視と両眼視、両眼輻輳と両眼視差、運動視差と両眼視差の役割や機能の差異、補完関係を明確にしておくことの重要性も確認された。



次に、錯視を生じさせるメカニズムについては、視覚系の分解能や視認性の他に視知覚系の認知メカニズムの内特に眼の合焦方法が重要な要素となっていることが明らかとなった。すなわち、遠点から近点へと合焦させる焦点移動ならびに調節方法が合理的で知覚感度を高める方法と考える。

眼は光学的には被写界深度域が遠点側に広く、近点側には狭いことから、相対比較作業のような場合には、近点側の方が焦点調節機能を発揮する必要がある。

相対比較作業などの場に於いては、遠点側から見た方が奥行量の差異判別はより顕著に認知されることになる。その反面、非熟練者では、錯視を生じやすくなるが、錯視は観察方法の訓練によって減らせる可能性があることも明らかとなった。

## 第4章 焦点調節機能と熟練度について

### 4.1 緒言

ヒトの両眼視による奥行量の弁別は、輻輳眼球運動、瞳孔調節、焦点調節、両眼視差、運動視差、網膜像の大きさ、過去の経験などによって行われている。

すなわち、複数の方法を併用しながら奥行量を知覚していると考えられている。

また、ヒトの眼の焦点調節に於いては、ボケ情報が最も本質的な役割を果たしているとも云われる(註, 1957 b)。そして、単眼視に於いては網膜像の大きさ以外は、焦点調節により知覚されていると考えられる。

両眼視に於いても、精密な焦点調節の場合には網膜像の状態からも情報を得ている。この場合の調節機能としては、ボケに関する情報を主として、その他の手掛かりは補助的な手段として利用されていると解されている。

すなわち、精密な、焦点調節機構においては、ボケに関する情報が最も本質的な役割を果たしていると考えられる。

両眼視による奥行弁別作業と習熟効果に関する研究を行ってきた。

そして、両眼視奥行弁別作業に於ける眼の焦点調節方法に於いて、視標の被写界深度域が被験者からみて遠点側に広く、近点側に狭いという光学的な特質を、奥行認知因子として活用することの有効性を前章で示したが、本章に於いては以下の3つの問題について実験をとおして考察を加えた。

- (1) 両眼視奥行弁別作業に於いて、眼の焦点調節能力を光学的特性を活用して高める方法を検討した。
- (2) 両眼視奥行弁別作業に有効な注視時間について、熟練者と非熟練者の比較を含めて検討した。

(3) ①；奥行弁別作業に於ける単眼視と両眼視との弁別能力の比較実験から、焦点調節機能の奥行知覚に対する影響について考察した。

②；単眼視奥行弁別に於ける眼の左右差、並びに利き眼と非利き眼の差についても考察した。

## 4. 2 研究方法

### 4.2.1 実験方法

第2章ならびに第3章に於ける実験と同様に、左右独立の光学系を有する実体顕微鏡を用い、視標を固定し、頭部運動を統制することで運動視差要因を排除した。さらに、観察距離の固定、両眼輻輳角、両眼回旋点間距離の矯正、接眼レンズ系による光学的な視度補正のほか、プリズムを使用して両眼回旋点間距離の個人差も同一光路上へ光学的に導く方法によって、その距離を一定に保つことで、その個人差を排除して実験を行った。

そして、奥行弁別作業を行わせる後述の3つの実験を熟練者と非熟練者に対して行った。

被験者には、眼位（カバーテスト法）、立体視（テストチャート法）、調節機能（指標移動式調節力検査法）、不同視（左右視力差の制限）、上下並びに横方向の輻輳開散力（Phoropter 実測）に異常のないことをあらかじめ確認した。

視標は、球形で表面に非常に微細なテクスチャがついた視認性の高い均一形状の白色粒子（ $\phi = 0.6\text{mm}$ ）をブロックゲージ上に一層しきつめた視標とした。

顕微鏡視野内の左半分と右半分に段差を設けた後、左右に配した2つの視標の奥行量の相対比較実験を行った。

視標である粒子の数は、奥行量の異なる左右それぞれが、190～210粒として、左右視標を同時観察する方法とした。

視標の照明方法は同軸落射照明とファイバー照明を併用して、奥行弁別効果因

子である、シャドウやテクスチャ（明暗勾配やキメの勾配）を抑制した。

また、視標の周囲（約0.5度付近まで）には視標以外の奥行に関する手掛かりが無いように注意し、第2章と同様に視標間の段差部分は、そのエッジが見えないように観察装置の光学系の被写界深度域外まで、すなわち顕微鏡観察時に焦点が合わない（ボケ）領域まで、視野に入る段差部分をマスキングした。

観察装置（実体顕微鏡）の被写界深度についても視標の奥行量に対して十分に余裕をもたせた焦点深度を視野全体に常に確保できる状態をつくった。

実験装置と原理については、第2章を参照されたい。

実験結果の表現方法としては、両眼視差角を用いた。視差角表示とした理由は、第1章で記述したとおり、両眼視による奥行弁別には、両眼視差の情報が重要な要因であり、その条件の規定方法として「眼から視標までの距離」と「視標間の奥行距離」が必要であるが、両方を規定する目的から相対角度表現を行った。

なお、実験に使用した視差角の値は、ブロックゲージを地（基準平面）として設置した後、その上に視標を並べて観察を行ったが、ブロックゲージの厚さの差を奥行量（距離）と考えて距離情報を視差角度に変換した値を使用した。

実験に於ける奥行量の決め方は予備実験の結果を基に決定したが、奥行量が極力等間隔、当倍となる値を考慮して決定した。

尚、奥行量とその両眼視差角（ $2\alpha_3$ ）の算出方法については、第2章を参照されたい。

被験者の回答方法は、左右の視標のどちらが手前（近く）に在るか、あるいは等しい位置に在るか、口頭で回答させる方法とした。そして、視標の左右への配置組合せなどの実験順序はランダム配置として事前に組合せを決定しておいた。

また、各試行間隔は2～3分とすることで継時的なコントラスト効果（残効）などの影響も排除した。

尚、奥行弁別の成績は、

$$\text{人数弁別率（人数％）} = \text{弁別できた人数} \div \text{試行人数} \times 100$$

として表現した。尚、当章に於ける弁別率とは、特にことわりのない限りは人数弁別率を示し、奥行弁別閾値は弁別率70％と規定した。

また、実体顕微鏡の総合拡大倍率10倍、観察距離 250mm、両眼回旋点間距離22mm、両眼輻輳角12.6度に設定した。

以上の方法により、それぞれの実験を行った。

#### 4.2.2 実験条件

（実験3－1）両眼視奥行弁別作業に於ける焦点調節能力を高める方法に関する実験に於いては、奥行弁別閾値近傍での奥行に関する手掛かりの得方、並びに焦点合わせの方法について、試行後毎に被験者から聞き取り、奥行弁別率と焦点調節方法との関連を調査した。この時、左右の2視標間の奥行は視差角を熟練者の場合は41秒、非熟練者の場合は54秒に固定設定した。

この値は前章において得られた熟練者と非熟練者の弁別閾値の近傍値である。

被験者には、各種の視覚系に異常のないことを確認済みの顕微鏡作業の経験年数3年以上の熟練者（24~35歳、平均年齢28.8歳の男子）8名と、経験2ヵ月以下の非熟練者（23~42歳、平均年齢31歳の男子）8名を用いた。

奥行弁別率は事前の実験から熟練者の場合、視差角41秒で88％、非熟練者の場合、視差角54秒で100％であった。

（実験3－2）奥行弁別作業に有効な注視時間についての熟練者と非熟練者との比較実験では、被験者毎に視標の実観察時間を測定・規制し、熟練者と非熟練者との弁別閾値の比較と熟練者による長時間注視観察の場合（10秒以上）と短時間注視観察の場合（3～7秒間の通常の見方）との奥行弁別能力の比較実験とした。

実験を行った奥行量は、視差角で41, 54, 82, 109, 136, 163秒である。

観察時間は、実験装置の接眼レンズに両眼が近づいた時点から、離れる時点までとして、ストップウォッチによる測定と経過時間の指示を行い、被験者には熟練者5名（24~35歳、平均年齢29歳の男子）と非熟練者5名（23~43歳、平均年齢28歳の男子）を起用した。

実験は相対比較実験ではあるが、実験の時期や環境などの条件により、奥行弁別閾は大きく変動し易いために、同一実験中での環境条件などによる変動を少なくする目的で、実験時間は週の一定した時期にと定め、短期間に集中して実験を行う工夫を施した。また、非熟練者に対しては自由観察時間の実験のみを行い、熟練者に対しては短時間注視観察を行った後に、長時間観察を同様に続けて行った。なお、長時間観察と短時間観察の実験間隔は20~30分以上となるよう考慮した。

（実験3-3）単眼視と両眼視、並びに単眼視の利き眼と非利き眼間及び右眼と左眼間の奥行弁別能力の比較実験を行った。

被験者は、視覚系に異常がないことを確認済みの22~30歳の男子大学生14名（右眼利き7名、左眼利き7名）を用いた。観察に於ける焦点合わせの方法は、熟練者の多くがとっている観察テクニックである遠点側から焦点を合わせるように、そして奥行量の比較は、視標粒子の頂点部分と、その周辺部の深さ方向には、ごく浅い部分を使って行うように被験者に事前に指示して観察方法の訓練を数回行って、被験者が観察方法を確認した後に実験を行った。

被験者に対する利き眼の判定法は、リングを通して2~3m先の視標を両眼視した後、左右眼で交互に単眼視した時に、リングからの視標のずれが少ない方の眼を利き眼と判定した。

この時、被験者に、鍵穴をのぞくときの眼、カメラのファインダーをのぞくときの眼、並びに利き眼の申告をしてもらい、全ての利き眼が一致している者だけ

被験者とした(解, 1993; 隼, 1993)。

視標の奥行量は、視差角で(41), (54), 82, 96, 109, 123, 136, 163, (204)秒の各点について行った。尚、( )内は、82, 96 秒ないし136, 163 秒の実験結果から試行を省略した値を示す。

#### 4. 3 結果

実験結果は、奥行量を視差角で表現した。視差角は、まず、視標の位置と奥行量をブロックゲージによる距離の差として決定した。次に観察光学系の補正值の距離換算を行った後に、視差角度への換算表現をとっている都合から、各図表に於ける奥行量の測定点が端数表示となったり、弁別閾値近傍が狭まった表現となっている。

(実験3-1) 各被験者5回の試行実験後の観察方法についての聞き取りの結果から、熟練者は第1回の試行時には、「質感等の集群による観察」「遠点側からの焦点合わせ」「近点側からの焦点合わせ」などの方法による試行を繰り返した後判断していることが推察された。

ヒトの眼レンズによる色収差による網膜像の輪郭着色、球面収差や非点収差などによる像のボケやニジミ等が、焦点がずれている方向を知る手掛かりとなっていると云われる(Stark and Takahashi, 1965; 鮎, 1990)。

また、どの要因を調節の手段として使用しているかもヒトにより異なり、個人差がある事が知られている(鮎, 1957a)。

今回の実験では、どの情報や方法で奥行弁別を行っていたのか明確な回答は得られなかったが、これは被験者が自覚し、意志的に実行しているのではなく、試行錯誤を含めた経験に基づく方法で決定し、実行しているためと考えられる。

しかし、第2回の試行以降は、熟練者の全員が「遠点側からの焦点合わせ」に

よって判断していることが被験者の口頭回答によって確認された。

一方、非熟練者に於いては、5回の試行について毎回の観察方法が一定せずに、7名が最後まで、その都度いろいろな観察方法で試行錯誤を繰り返していたことが推察された。

また、焦点調節に於いては注視目標である視標位置と実際の注視点との差異、すなわち焦点はずれ量の検出過程に於いて検出閾値が存在する。網膜上に閾値と等しいかそれ以下のずれ量を生ずるような状態に調節力を保っている時が、最も安定な状態であると考えられている。そして、この時の焦点はずれの程度を”定常誤差”と云う。この定常状態で網膜上に保持されている像は、網膜上で検出できる（最小）限界量のボケを伴っていると考えられている(鯉形, 1971)。

また、定常誤差の大きさはヒトの眼の焦点深度の  $1/2$  の量に等しいと考えられている(Ogle and Schwartz, 1959)。

眼が検出できるボケの最小値、すなわち定常誤差を  $\Delta D$  とした時のボケの大きさである点像強度分布関数の直径  $d_0$  は図 4-1 に示すとおりである。

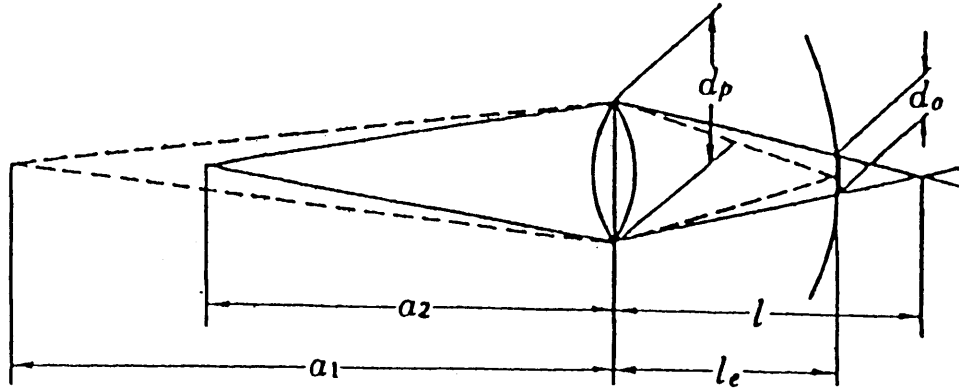
(実験 3-2) 各被験者 5 回の試行に於ける熟練者の注視時間の平均値と標準偏差は、第 1 回目の試行時は  $7.0 \pm 2.5$  秒、第 2 回以降は  $4.1 \pm 0.7$  秒であった。

また、非熟練者は第 1 回の試行時は  $8.9 \pm 3.8$  秒、第 2 回以降は  $6.0 \pm 2.2$  秒であった。

今回の実験に於ける注視時間には、網膜上にボケを知覚した後の、毛様体筋の緊張と弛緩作用が、毛様体小帯を介して水晶体前面の変位を生じさせた後に、網膜上で検出された注視点の補正などを含むフィードバック制御系(Davson, 1962) に於ける経過時間の他に、奥行弁別閾値近傍に於ける繰り返し確認補正作業時間を含むことが推察された。

奥行弁別に有効な確認補正作業とは、注視点を注視目標近傍に於いて、一度仮決定した後に、定常的な位置のずれである調節ラグを減少させる目的で、仮決定





$$\begin{aligned} \frac{1}{a_1} + \frac{1}{l_e} &= \frac{1}{f} & \therefore \Delta D &= \frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{l_e} - \frac{1}{l} \\ \frac{1}{a_2} + \frac{1}{l} &= \frac{1}{f} & &= \frac{1}{l_e} \cdot \frac{l - l_e}{l} \\ \frac{l - l_e}{l} &= \frac{d_o}{d_p} & &= \frac{d_o}{d_p \cdot l_e} \end{aligned}$$

- f : 眼の焦点距離
- l : 網膜上にボケを生じた時の焦点位置
- l<sub>e</sub> : 眼のレンズから網膜までの距離
- a<sub>1</sub> : 注視点から眼のレンズまでの距離
- a<sub>2</sub> : 視標から眼のレンズまでの距離
- d<sub>p</sub> : 瞳孔径
- d<sub>o</sub> : ボケの大きさ (錯乱円の直径)
- ΔD : d<sub>o</sub> の焦点はずれ量 (定常誤差)

図 4 — 1 焦点はずれとボケの大きさ (d<sub>o</sub>) の関係

(笠井ら, 1971)

注視点から注視目標をまたぐ調節の引戻し作業と考察する。

また、この確認補正作業は、その繰り返す試行回数が多い程、そして所要時間が長い程、弁別感度を低下させる大きな要因となっていることが注視時間の差による奥行弁別率の比較（図4-2）からも推測される。

そして、観察時間を指定した時の実験結果は、短時間注視の場合には、奥行弁別率70%を弁別閾と規定した比較では、図4-2の通り、視差角41-54秒に弁別閾値が存在する事が確認された。また、長時間注視の場合は視差角54~82秒の間に弁別閾値が存在することが明らかとなった。

すなわち、熟練者に非熟練者の平均的注視時間である長時間注視を行わせた場合は、熟練者の弁別率は低下して、非熟練者の弁別率に近い低い弁別の傾向を示した。

（実験3-3）同一視差角に対する各被験者の試行回数は1回限りとした実験の結果、①右眼が利き眼の被験者の場合は、図4-3ならびに表4-1（a）のとおり、弁別閾値近傍までの奥行弁別機能は、両眼視が単眼視に比べて優位な結果となった。すなわち、奥行の差が十分に知覚できる領域では、両眼視、利き眼の単眼視、非利き眼の単眼視ともに弁別機能に差異は認められないが、弁別閾値近傍に於いては、両眼視による弁別が優れていた。

また、弁別閾値近傍での単眼視に於ける比較では、弁別率70%における視差角の比較では、13秒程閾値が右眼優位、また「利き眼が右眼の場合」の図4-3の弁別率の傾向からも、右眼が優位の傾向が読み取れる。すなわち、利き眼の右眼が左眼より優れた結果となった。この場合の弁別能力の高い順位は「両眼視」「利き眼（右眼）の単眼視」「非利き眼（左眼）の単眼視」の順となった。

すなわち、右眼利きの場合の奥行弁別能力は、利き眼の右眼が優位の左右差が認められた。

②左眼が利き眼の被験者の場合は、図4-4ならびに表4-1(b)のとおり、弁別閾値近傍までの奥行弁別機能は、右眼利きの場合と同様に、両眼視が単眼視に比べて有利であった。すなわち、奥行の差が十分に知覚できる領域では、両眼視、利き眼の単眼視、非利き眼の単眼視ともに弁別機能に差異は認められないが、弁別閾値近傍においては、両眼視による弁別が優れていた。

また、弁別閾値近傍での単眼視に於ける比較では、弁別率70%における視差角の比較では7秒程閾値が右眼優位であった。

また、「利き眼が左眼の場合」の図4-4の弁別率の傾向からも、右眼優位の傾向が読みとれた。すなわち、非利き眼の右眼が左眼より優位な結果となった。

この場合、弁別能力の高い順位は「両眼視」「非利き眼(右眼)の単眼視」「利き眼(左眼)の単眼視」の順となった。すなわち、左眼利きの場合の奥行弁別能力は、利き眼でない右眼が優位の左右差が推察される。

利き眼が右眼と左眼の場合の実験結果から、単眼視による奥行弁別に於いては、利き眼、非利き眼にかかわらず左眼より右眼の方が優位な傾向が現れた。

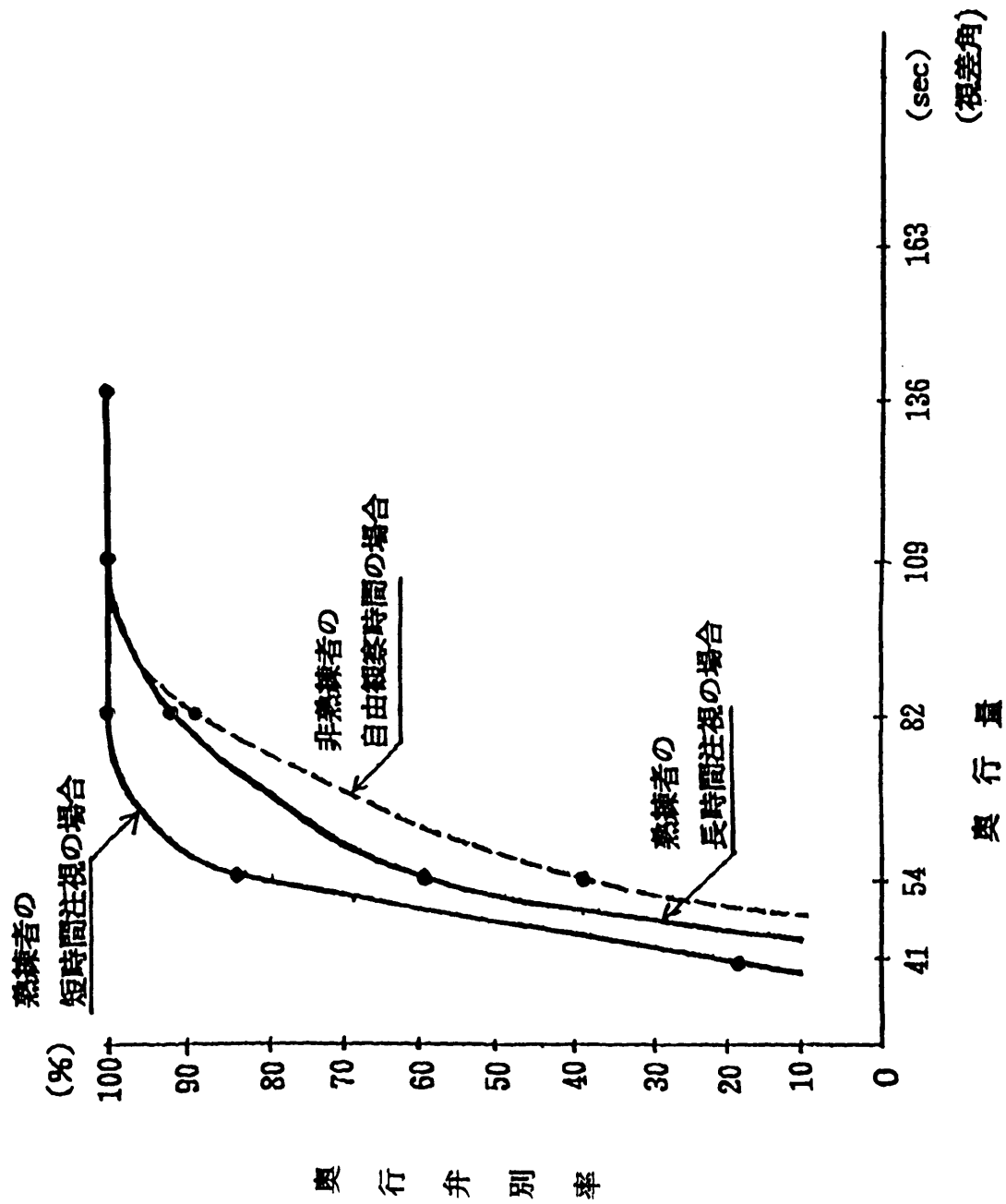


図4-2 注視時間の差による奥行弁別率の比較

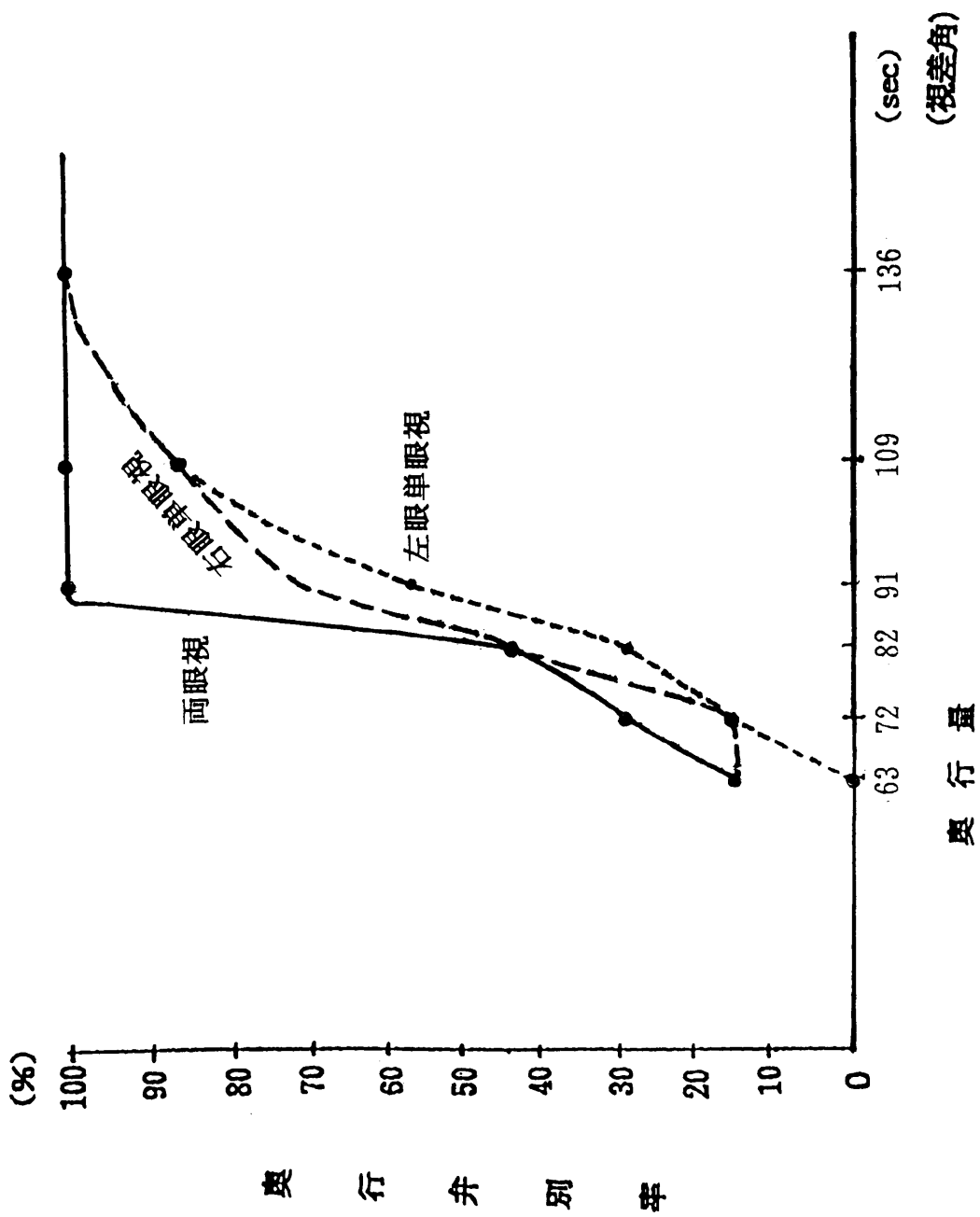


図4-3 利き眼が右眼の場合の奥行弁別率 (N = 7)

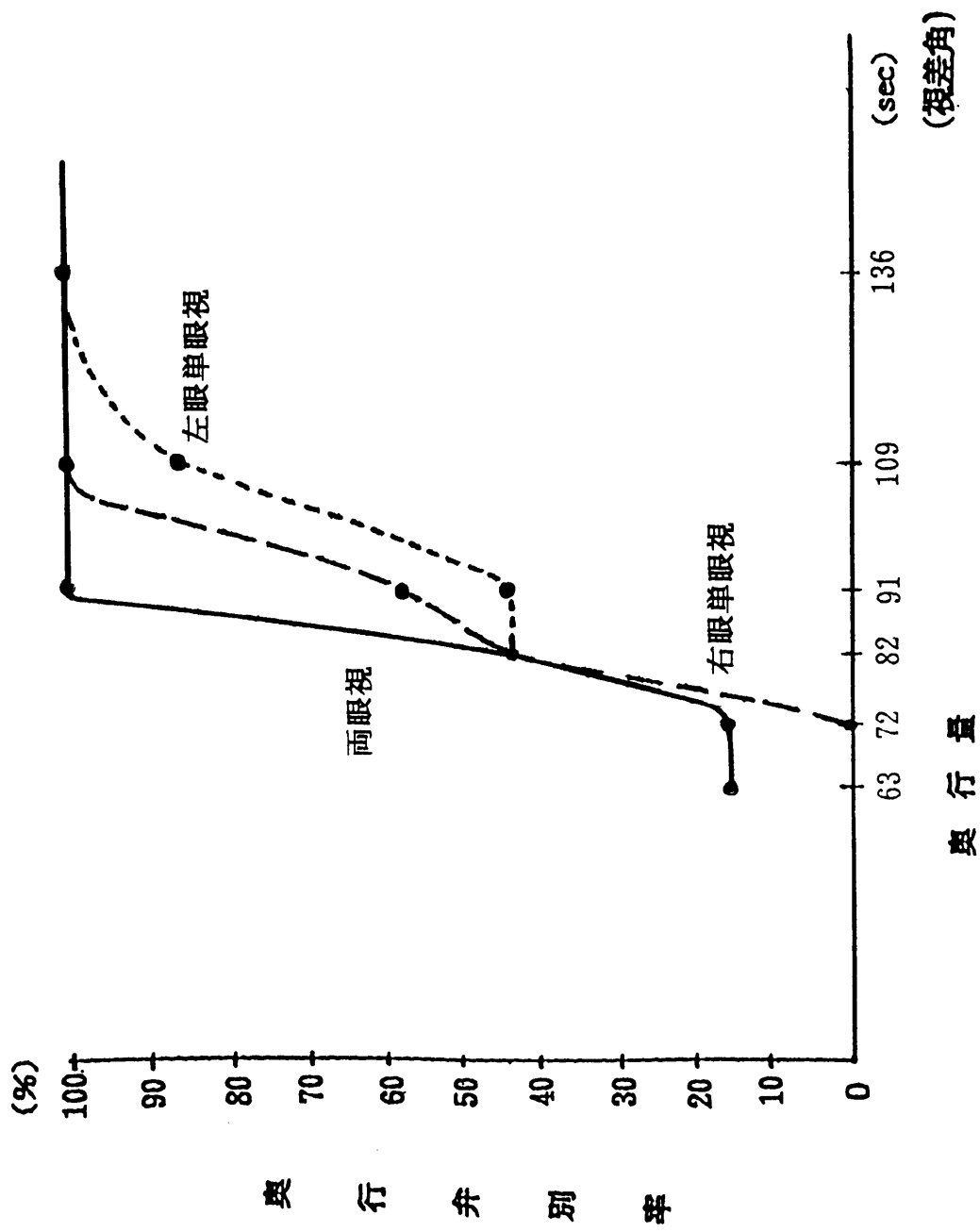


図4-4 利き眼が左眼の場合の奥行弁別率 (N = 7)

表中の記載順序は、各欄毎に左から両眼視、左眼単眼視、右眼単眼視の順で、  
○：正答、×：誤答、-：弁別不能を表す。

被験者／奥行量	63秒	72秒	82秒	91秒	109秒	136秒
①	--○	--○	--○	○×○	○○○	○○○
②	○--	○-×	○×○	○○○	○○○	○○○
③	×--	○--	○--	○-×	○×○	○○○
④	--○	--○	-×○	○○○	○○○	○○○
⑤	-×-	×○×	○○○	○○○	○○○	○○○
⑥	---	-×-	×○×	○○○	○○○	○○○
⑦	---	---	×--	○×-	○○×	○○○
弁別率 (%)	14, 0, 29.	29, 14, 29.	43, 29, 57.	100, 57, 71.	100, 86, 86.	100, 100, 100.

表4-1 (a) 利き眼と弁別閾値 (右眼利きの場合)

被験者／奥行量	63秒	72秒	82秒	91秒	109秒	136秒
①	---	--×	×-○	○×○	○○○	○○○
②	○--	○--	○--	○××	○○○	○○○
③	---	×--	○--	○--	○×○	○○○
④	---	---	×○-	○○×	○○○	○○○
⑤	---	-×-	×○×	○○○	○○○	○○○
⑥	---	--×	×-○	○×○	○○○	○○○
⑦	-○-	×○×	○○○	○○○	○○○	○○○
弁別率 (%)	14, 14, 0.	14, 14, 0.	43, 43, 43.	100, 43, 57.	100, 86, 100.	100, 100, 100.

表4-1 (b) 利き眼と弁別閾値 (左眼利きの場合)

#### 4. 4 考察

眼の調節緊張時間は、単眼視の場合は約0.98秒、両眼視の場合は0.67秒、弛緩時間は、単眼視の場合は約0.5~0.6秒、両眼視の場合は0.9~1.0秒で、単眼視の場合は、緊張時間>弛緩時間、両眼視の場合は、逆に緊張時間<弛緩時間になるという報告がある(榎, 1966)。両眼視の値には輻輳、開散の要因を含むものである。

眼光学的には、眼の焦点深度に関する図4-5(ヒトの眼の焦点深度とボケの構造を示す)ならびに、注視目標に於ける被写界深度に関する図4-6(像面側の焦点深度と、そのピント域(state of focus)である被写界深度域が、注視目標(P)よりも近点側深度( $d_1$ )と遠点側深度( $d_2$ )では、光学的な深度量(域)が異なり、 $d_1 < d_2$ の関係にあるという関係を示す)に示すとおり視標側に於いては、注視目標に於ける被写界深度域は遠点側が広く、近点側が狭いことが知られている。

一方、網膜側の焦点深度域に於いては、網膜側焦点深度が広く、水晶体側焦点深度が狭い。

両眼視による注視目標への焦点合わせの方法として、注視開始時に於いては注視目標が眼の焦点深度外に存在する場合には、像のボケ調節を毛様体筋の緊張と弛緩に伴う水晶体の変位と輻輳運動の変化量の大きい方から、「常にボケが減少する方向へ焦点を合わせて行き」、また、ボケが知覚されない被写界深度域内に注視目標が在る場合には、縮瞳、すなわち瞳孔径の変化量が大きく、「知覚し易い遠点側からボケ情報をもとに焦点合わせを行っている」という報告がある(榎, 1957b)。

視標側に於いては、注視目標より遠点側の被写界深度範囲内に於いて注視点が決定されているという考え方もある(榎ら, 1971)。

今回の奥行弁別実験では、熟練者の観察方法についての実験後の聞き取り調査



遠点側被写界深度 ( $f_1$ )  
 近点側被写界深度 ( $f_2$ )  
 被写界深度 ( $f$ )

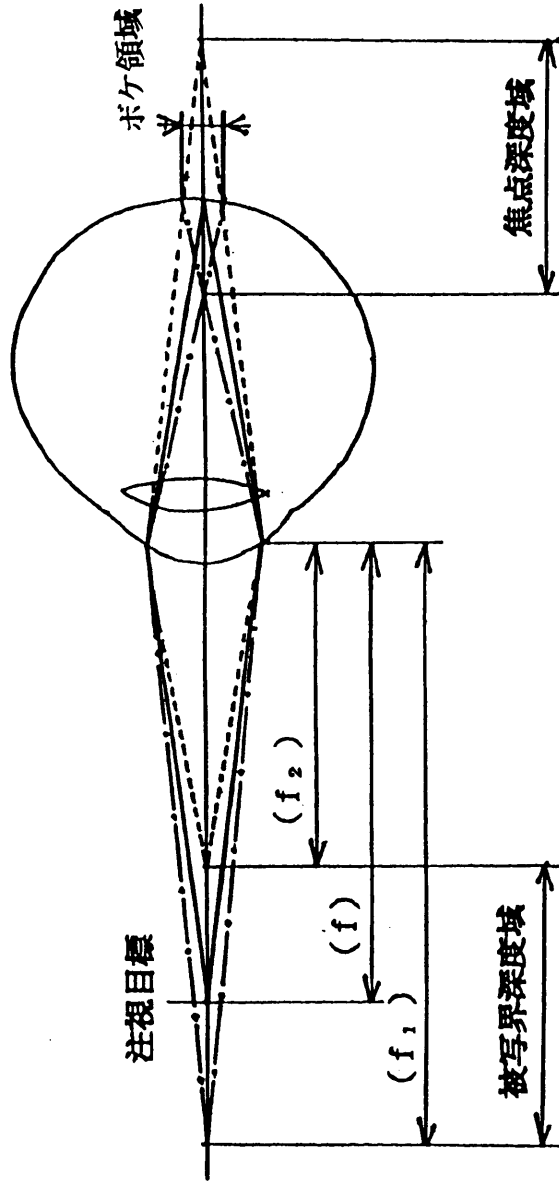


図 4 - 5 眼の焦点深度

**P** : 注視目標  
**f** : 被写界深度  
**R** : 遠点側被写界深度域  
**Q** : 近点側被写界深度域  
 $f = R - Q$  : 被写界深度  
**P'** : 結像位置

**$d_1$**  : 近点側被写界深度域  
 **$d_2$**  : 遠点側被写界深度域  
 $f = d_1 + d_2$   
 $d_2 > d_1$

**$d_1'$**  : 網膜側焦点深度域  
 **$d_2'$**  : 水晶体側焦点深度域  
 $f' = d_1' + d_2'$   
 $d_2' < d_1'$   
 **$f'$**  : 焦点深度

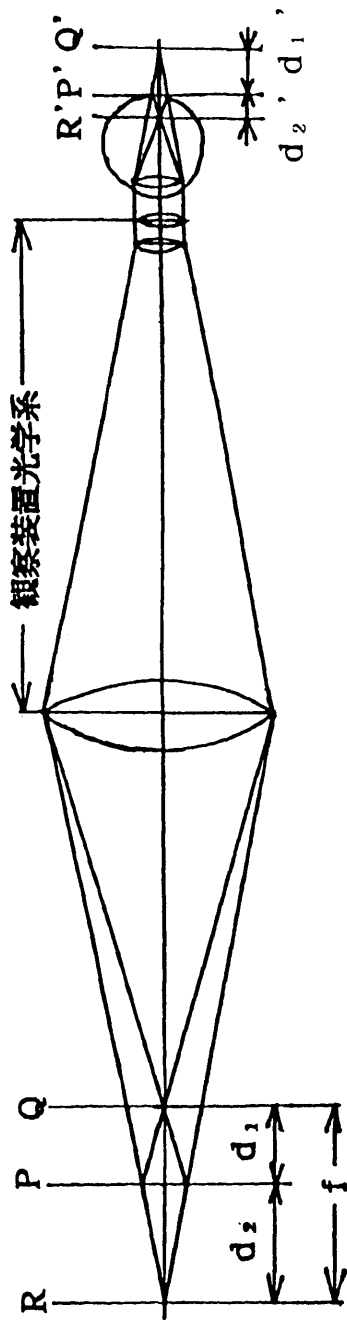


图 4-6 注視目標に於ける被写界深度

結果に基づいた観察方法である、被写界深度域が広い遠点側から注視し始めた後、深度域が狭い近点側に注視点を求める作業を要求したことから、ある時間継続して繰り返し同様の注視作業を行っている、すなわち、注視点から注視目標へ向かって再度調節を行っている事が推測される。

また、今回の実験では、調節以外の奥行知覚要因を極力統制、ないし排除する目的から実体顕微鏡を介した観察方法を採用したことから、被験者に高齢者が居なかったという背景もあるが、観察系を構成するシステムに「機器近視」の影響が存在している事も考慮する必要がある。

すなわち、網膜側の焦点調節では、熟練者の観察方法と機器近視による影響を含めて、調節安静位を含む注視開始位置が網膜より水晶体側の狭い焦点調節域に存在している事が推測される。そして、網膜側に向かって調節を行っている事が推察される。

この観察方法は、視認性のうえからは、「変位量の知覚がし難い」という障害要因と、「焦点調節の方法が難しい」という課題を含むが、調節機構には混乱が少なく合理的な方法と考える。

また、眼の注視点と明視域・ボケ知覚域についての図4-7（明視域は像面側の被写界深度域で、ボケは知覚されない領域であるが、注視点がP点から離れるに従って奥行感が知覚され易くなる。ボケ知覚域は明視域以外の領域で、明視域から離れるに従ってボケ量は拡大されるという関係を示す）に示すとおり、明視域は注視目標の被写界深度域内のボケが知覚されない領域であり、明視域内に於いては注視点が注視目標から前後に離れるに従って奥行感が知覚され易くなる。

そして、注視目標を挟む明視域以外の領域の近点側並びに遠点側がボケ知覚域である。ボケ領域では、明視域から前後に離れるに従って、知覚されるボケ量は拡大されて行く。

また、注視目標と注視点との差異は「調節誤差」として扱われる。

- P : 注視目標
- P' : 注視点
- P-P' : 調節誤差量
- Q-R : 被写界深度 (f)

明視・ボケの程度

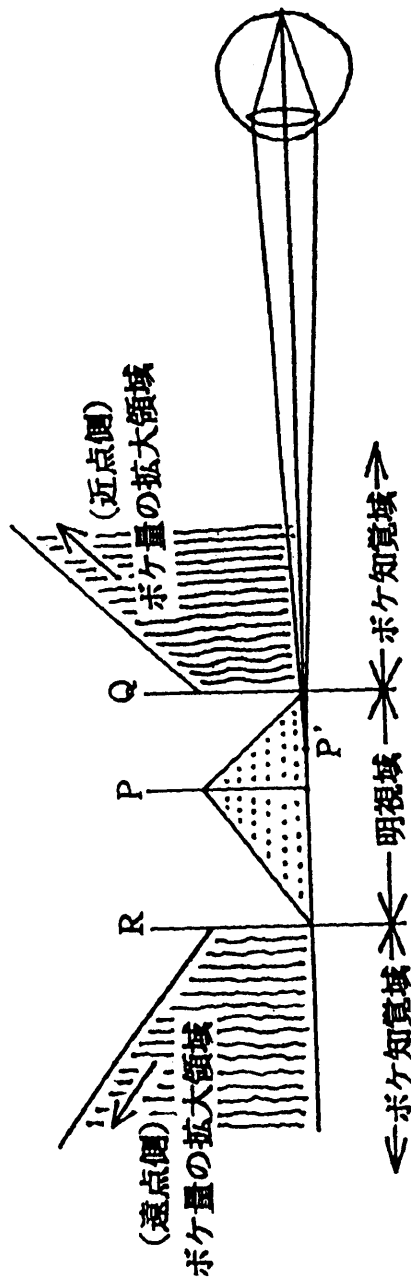


図4-7 眼の注視点と明視域・ボケ知覚域

注視目標より遠点側の被写界深度は、注視目標より近点側に比べて深度域が広いが、網膜側の焦点調節に於いては、前述のとおり水晶体側が狭く、狭い分だけ調節誤差が網膜側より少なくなる。

通常視に於いて決定された注視点から、注視点を網膜側の深度域へ入れた後に再度、水晶体側へ戻していく方法により、最終注視点を求める調節方法は、弁別精度が高い注視位置検出の方法と推察される。

非熟練者の注視点の求め方は、注視開始時に注視目標が眼の焦点深度外に存在する場合でも、眼の焦点深度内に在る場合でも、熟練者と同様に調節が行われていると推察されるが、熟練者との違いは、注視目標の手前に注視点を定める、ないし近点側被写界深度範囲内に注視点を定めた後の注視点の再確認作業行動が異なる為かと推察される。

すなわち、「熟練者とは異なる再確認作業方法を行っている」あるいは「繰り返し確認方法が不定である」または「過度の長時間注視を行っている」などの結果として、弁別精度を高めきれず、逆に「疲労」や「錯視効果」そして「複視」の出現などの影響が、弁別能力の低下として実験結果に現れたものではないかと推測する。

今回の実験結果から、調節による奥行弁別精度を高める大きな要因は、ボケ情報の検出を含む注視目標の焦点域内での最終注視点の求め方が、大きく関わっていることが推察された。

視標注視時間は、第2回以降の試行では熟練者の平均値が  $4.1 \pm 0.7$  秒であるのに対して非熟練者は  $6.0 \pm 2.2$  秒であり非熟練者の方が熟練者よりも45%以上も注視時間が長い結果となった。

熟練者も非熟練者も第1回の試行では観察方法を模索して時間を費やしたが、熟練者は第2回以降の試行では各自が選定した観察方法による観察を繰り返していたことが聞き取り調査からも明らかとなった。

第1回の試行では、最適な観察方法を学習したのではなく、奥行量の差の大きさに最適な観察方法の”選定”を過去の経験に基づいて行っていたのではないかと推測する。

熟練者が奥行弁別作業に於いて、閾値近傍でみせる観察方法、すなわち、注視点を定める手掛かりを得る視対象を質感等の部分情報（マイクロ視）の観察から集群情報（マクロ視）の観察に切り替えるタイミング判断の良さが、熟練者の弁別能力の優れている理由の一つと考察する(醜と懺, 1994)。

また、熟練者と非熟練者の観察時間の差異並びに熟練者の注視時間と弁別率に関する実験結果から、ピントのボケを検出し、そのボケ量を小さくするための焦点調節のメカニズムは、奥行弁別閾値近傍などの僅かな奥行量を識別する作業に於いては、7秒以下の短時間注視を行うことが有効な観察方法であることが明らかとなった。そして、10秒以上の長時間継続注視を行うことは、視覚系の疲労や順応効果を生じて、奥行弁別の感度（精度）の低下をきたすことが実験結果からも明らかとなった。

すなわち、長時間注視作業は、網膜中心窩で一点を長時間固視することによる被結像錐体の順応に加えて、固視微動の跳躍運動（flick）や移動（drift）機能をつかさどる外眼筋の緊張の持続に伴う疲労、並びに微震（tremor）を主とする眼球調節運動機能（反応）の疲労や順応により、近業（視）特有の調節衰弱と眼精疲労を生じ、視調節機能は時間の経過とともに減衰して、その感度低下をきたしているものと推察する。

以上の実験による結果から、長時間注視作業を行う場合には、視線や視標に動きを持たせるなどの方法により、順応による弁別能力（感度）の低下を遅らせる可能性が推察された。また、両眼視と単眼視、単眼視の左右眼、並びに単眼視の利き眼と非利き眼に関する奥行弁別能力の比較を行った実験結果からは、調節機能の奥行知覚に対する影響については、奥行は視対象間に十分な奥行量が存在し

ている間は、それぞれに関する差異は認められずに弁別されていることが確認された。

また、奥行弁別閾値近傍に於いては、両眼視による弁別が単眼視より優れていた。すなわち、「単眼視による焦点検出方法では、一度に一つの距離情報しか得ることができないが、両眼視では、細かい立体構造を一度に把握することができる」と云う両眼視差の特性要因を、本来は焦点調節が特に有効に機能している微細領域に於ける奥行弁別時にも、併用して有効に活用されていることが推察される結果となった。

また、単眼視による奥行弁別に於いては、利き眼、非利き眼にかかわらず左眼より右眼の方が優れていることが考察された。

#### 4. 5 結論

奥行弁別作業に於ける焦点調節機能に関わる要因の比較実験を通じて、微細領域に於ける奥行弁別に優位な観察方法と視機能訓練の方法について考察を加えた結果、以下の結論を得た。

(1) 視標が眼の焦点深度内に入った後の注視点の決め方が、調節による奥行弁別精度を高める大きな要因であることが確認された。

(2) 弁別閾値近傍の僅かな奥行量を識別する場合、短時間注視（7秒以下の注視作業）の有効性が明らかになった。

また、長時間継続注視（10秒以上の注視作業）を行うと、弁別感度（精度）の低下をきたすことが明らかとなった。

(3) 奥行弁別作業時の、両眼視、利き眼と非利き眼の単眼視に於ける調節能力

の比較では、両眼視の弁別能力が高いことが明らかとなった。

そして、単眼視に於いては、利き眼、非利き眼に関わらず左眼よりも右眼の弁別能力が優れていることが考察された。



## 第5章 融像性輻輳機能の訓練効果について

### 5. 1 緒言

実体顕微鏡などの両眼単一視融像作業に於いて、眼科的な疾患が認められない場合でも、左右眼からの像の融像が困難ないしできない者が希にみうけられることがある。

一連の両眼視による奥行知覚と弁別に関する実験に於ける非熟練者の被験者候補者に於いても、両眼視機能についての異常や障害は認められないにもかかわらず融像困難な者が数名いた。この人数は一般に云われる融像困難者の存在確率から勘案するとだいぶ多い人数である。また、今までに報告されている事例のほとんどは、1～2時間の訓練で融像ができるようになっているが、まれに訓練に1～3日を要したとか、更に時間を掛けたができなかったという報告もなされている。

半導体工場の外観検査や病院などの検査室では、顕微鏡作業のために多くの人を配しているが、もしも両眼視に於ける融像困難な人が多いとなると、顕微鏡作業のための人員確保が大変な問題となるところであるが、ヒトの眼の融像機能は訓練効果によるところが大きいことや、全く融像困難なことが少ないために、一般にはまだあまり注目されていない状況にある。

眼の機能は非常に多くの要素から成り立っており、またそれぞれの機能が干渉し合い補完し合っているために、視機能障害の原因は特定し難い。

特に輻輳障害に関するものは、多くの場合は眼や脳の機能補完と代償とによってシステムが成り立っているため、働きを機能別に分けて捉えることが難しい。

ヒトの視機能については、視野計測などに於いては訓練効果の影響が大きいことが経験的には既に知られているが、眼の輻輳や融像を行う場合に於いても、主として外眼筋の訓練効果が大きく関わっていることが、顕微鏡作業や双眼鏡観察作業に於ける融像困難者の存在とO. J. T. (職場内訓練)の実績報告などか

ら予測される。

そこで、両眼視奥行弁別に於いて、焦点調節と同様に重要な機能である輻輳機能(convergence)のうち、特に両眼単一視する機能である融像性輻輳機能(fusional convergence)についての実験をとおして、融像困難ならびに不可能な者に対する効率的な融像性輻輳機能の訓練方法について考察した。

## 5. 2 研究方法

双眼鏡や実体顕微鏡などの両眼単一視作業に於いて融像困難者に対する、融像性輻輳機能の訓練方法として、自覚式検眼装置(Phoropter:AMERICAN OPTICAL社製)を使用した融像性開散力を測定する方法(Dodwell and Engel,1963)によって、輻輳力を少しずつ高めていく眼筋訓練を行った。

そして、強制的に輻輳を生じさせるために、左右眼にプリズムを付加するプリズムの初期強度と更に追加し増加させていく場合の負荷強度の最適な初期値と効率的な負荷増加量を実験的に求めた。

### 5.2.1 実験方法

被験者には、眼位(カバーテスト法)、立体視(テストチャート法)、不同視(左右視力差の制限)に異常のないことをあらかじめ確認した。

実験方法は、ランドルト環視標で内部照明式(光束発散度500r1x±150r1x)の標準視力検査装置(高田製)5m用と、前述の自覚式検眼装置により、屈折・調節視力を片眼ずつ測定して確認した後、自覚式検眼装置の視力補正機構を使ってプリズム強度を高めていく実験方法をとった。

実験は視標(固視点: fixation point)を対称性輻輳による注視作業として、まずPhoropterのプリズム強度をゼロ値から始めて、まず内側(被験者の鼻側)にプリズム基底(△)を動かすことで開散力を求めた。

この時に、両眼に同量づつの強度を順次負荷することで、像のボケや複視が生ずる限界値を求めた。

次に、プリズムの基底を外側に（被験者の耳側に向けて）プリズムの基底を動かして輻輳力を求めた。

輻輳力ならびに開散力の限界値は、視標のボケはじめ(blur point)まで、すなわち複視の出現点（直前）に於ける負荷プリズム強度までとした。

複視出現点(break point)に於いては、0.5 Prism Diopter( $\Delta$ )づつ戻すことで、複視が消失する点(recovery point)を確認した後に、再度複視出現点を求める確認作業を行った。

ここでは、調節力(Diopter) = (1/遠点距離) + (1/近点距離) で表す。  
また、輻輳角と開散角の差を比較融像幅と定義する。

### 5.2.2 実験条件

被験者には、視力調節、瞳孔運動、両眼視機能についての異常や障害が認められない22~24歳の男子4名の大学生で融像困難な者を起用した。

すなわち、融像作業時に複視の出現や左右いずれかの片眼視を行っていることが事前に確認できた者とした。

また、視標は角膜から視標までの距離5 m（遠見視標：0.25Diopterの調節負荷相当）用と、1/3 m（近見視標：3Diopterの調節負荷相当）用の2種を用いた。自覚式検眼装置による実験は写真5-1のとおりである。また、実験に於ける光学的な原理は図5-1に示すとおりである。

図5-1に於ける負荷プリズムの強度を変えることと、プリズム基底を左右反転させる方法で実験を行った。尚、視力補正系では（球面レンズによる補正值） $S \pm 1.5$ Diopterまでの視力補正を行い、乱視に関する補正は行わなかった。また、実験前に視力の確認作業を行い、左右眼の調節力の差が1.5Diopter以上あるか、



写真5-1 実験装置

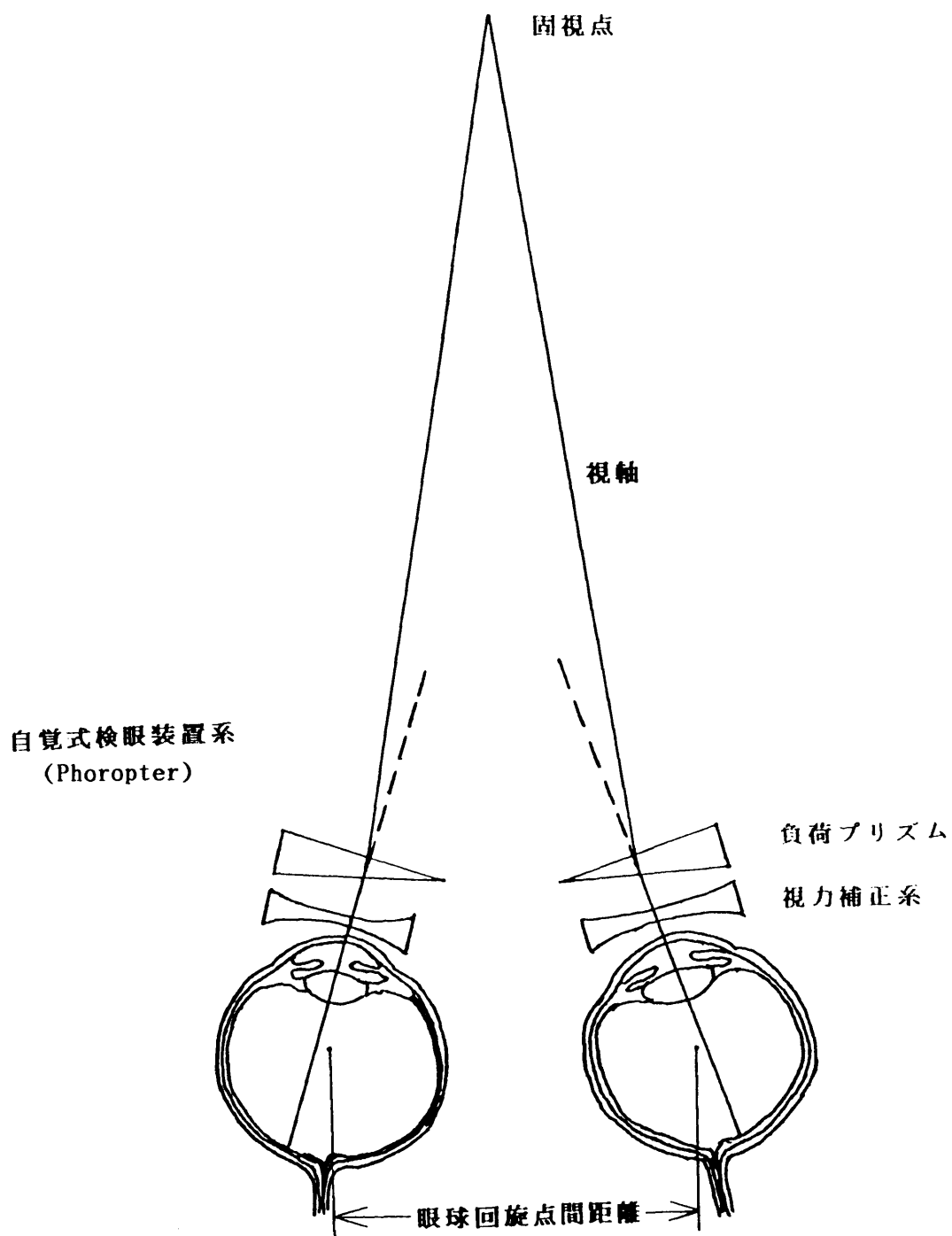


図5-1 融像性輻輳実験装置の原理図

または、乱視強度が1.0Diopter以上ある場合には、その被験者のデータは除外する方法をとった。

観察視標に関しては、近見視標（図5-2）は見易さだけを重視した形体に、そして、遠見視標（図5-3）は被験者が若年層に限っていたことから、若年層に多い乱視軸度（ $90^\circ$ ならびに $180^\circ$ ）による調節ボケの影響を避けた視標形体とした。そして、どちらも視認性の良い異形図形を用いた。

また、自覚的な輻輳限界の口頭による回答の定義としては、“神経を集中させていると融像するが、気を抜くと復視となる位置”と定義した。

予備実験の結果から、当実験は習熟効果が非常に大きく、数少ない被験者に対する再度、習熟過程を再現することが困難な実験であることから、融像力の測定時には、実験途中での習熟を阻害させる目的で、試行時間を15秒以内と制限した。

但し、融像訓練の時にはこの時間的な制限は無くした。

### 5.3 結果と考察

融像性開散力を測定する方法によって効率的な輻輳訓練を試行した結果、被験者の4名中3名が30分～1時間強の訓練時間の後に、両眼単一視に於ける左右像の融像作業が可能となった。

実験結果は表5-1のとおりである。

すなわち、融像力が低かった被験者に於いては、（融像の標準的値を100%とした時）遠見視標の場合には61%～104%レベルまで融像力が高まった。

また、近見視標の場合には、81%～99%レベルまで融像力が高まった。

尚、垂直融像に関しては、特に訓練は行わなかったが、水平方向の融像訓練後の計測値を参考に表5-1に付した。

図5-4は融像性輻輳力が充分にある被験者の実験結果の一例である。○印は充分に輻輳力が得られている場合を表し、×印は復視出現点を表す。融像困難者

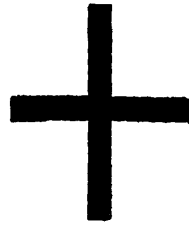


図5-2 融像性輻輳実験に於ける近見視標

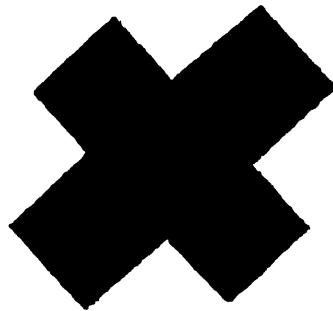


図5-3 融像性輻輳実験に於ける遠見視標

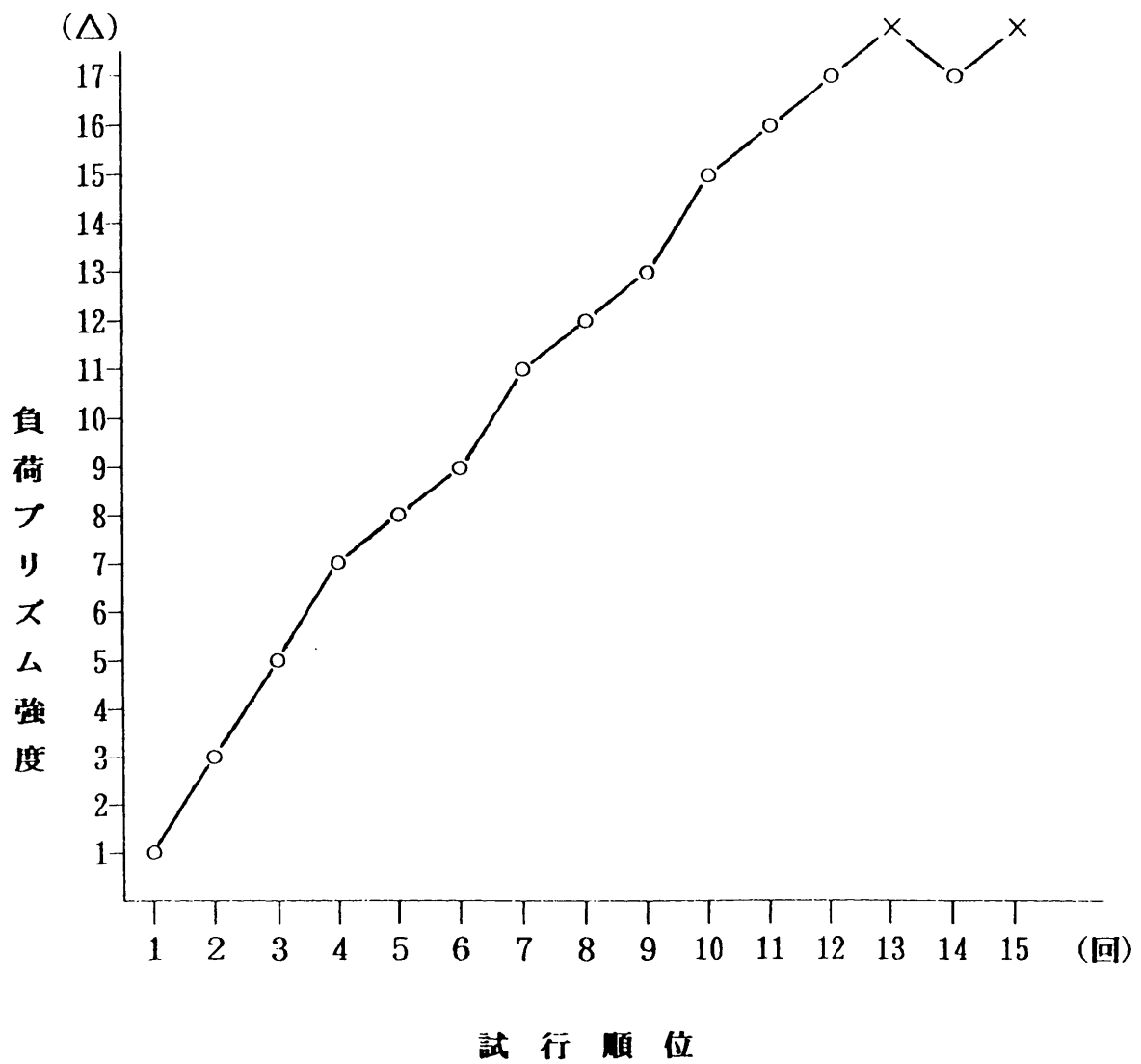
表5-1 融像性輻輳困難者の機能訓練（後）の輻輳開散力

単位: Prism Diopter( $\Delta$ )

被験者 P, D, (m/m)	遠見視標 (5 m) 輻輳 開散 (比較融像幅)	近見視標 (1/3 m) 輻輳 開散 (比較融像幅)	垂直融像 遠見/近見
M-1 54	15 4 ( 19 )	19 9 ( 28 )	1/1
M-2 59	18 6 ( 24 )	22 12 ( 34 )	2/2
M-3 68	9 5 ( 14 )	18 13 ( 31 )	2/3
M-4 60	- -	- -	-/-
運動性融像 の標準値 (比較参考値)	15 8 ( 23 )	20-25 12 ( 32~37 )	3/6

(遠見視標が6m, 近見視標が1/3mの場合 : 神前, 1978)





**図 5 — 4 健常者の場合のプリズム負荷方法による融像性輻輳量 (N = 1)**

の場合には初期の複視出現点は2～5Prism Diopter 程度の負荷強度で現れるが、訓練の結果は、前述のとおり、ほぼ図5－4の被験者に近い値が得られた。

しかし、残り1名の被験者については、この方法では融像までの訓練効果は得られなかった。

融像力が低い融像困難者の両眼に負荷するプリズム量としては、被験者毎の融像力限界値（0～）近傍から1～2Prism Diopter( $\Delta$ )づつプリズム強度を付加していく方法が、融像困難者の融像力を高めるための外眼筋等の訓練方法として有効な方法であることが実験により明らかとなった。

また、この時に3Prism Diopter( $\Delta$ )以上のプリズム負荷量を加えた場合には、融像力を”高める”ないし”付ける”ことができなくなることも実験の結果から明らかとなった。

すなわち、効率的な融像訓練時には閾値近傍ではプリズム付加する量を2Prism Diopter( $\Delta$ )以内となるように設定することが必要である。

#### 5. 4 結論

”融像機能の習熟訓練”とは、多くの場合は、単に眼筋の使い方の”きっかけ”を作る作業で、一度そのコツがつかめると急速に融像が可能となる。あるいは融像力が急速に高まることが明らかとなった。

すなわち、双眼鏡や実体顕微鏡などの両眼単一視作業に於いて、左右眼の像を融像困難な者でも”眼筋の使い方の訓練不足”を原因とする場合には、両眼に前述の規定量づつプリズムを負荷する方法による眼筋訓練の方法が短時間で速効性のある訓練方法となることが明らかとなった。

## 第6章 総括

「実体顕微鏡を用いた微細領域に於ける奥行弁別作業に関する研究」と題して、両眼視による奥行知覚に関する研究を行った。

本章では、研究の成果を総括することで、ヒトの眼の奥行知覚に関する機能の信頼性、効率性、快適性の向上のための施策について検討を加えるものである。

各章毎の内容及びその成果を要約すると以下のとおりである。

第1章では、両眼視による奥行弁別作業に於ける特徴と諸問題、ならびに弁別機能に関するこれまでの研究の動向を吟味し、本研究の目的とその対象を明確にすることができた。

すなわち、運動視差と両眼視差とは、ともに注視物体を基準とした物体間の相対距離検出であり類似機能特性を有するものであるが、両眼視差機能に注目した今回の研究においては、従来の実験研究ではあまり明確に区別されていなかった網膜上にできる像差を、両眼視差と観察位置の移動により左右眼に生ずる網膜像の“ズレ”として検出される運動視差の機能として明確に分けて捉えた実験を行ったことで、両眼視差要因のみによる奥行知覚機能の研究を行うことができた。

また、今回の研究では、両眼視差と運動視差との複合感覚による補完機能などの問題へ踏み込むには至らなかったが、顕微鏡作業などの視覚作業に於ける“疲労”や“順応”の問題に関する研究課題とも含めて捉えるべき要因であることが推察された。

第2章では、作業の視認性を論ずる上で最も基本となる人間の特性を取り上げた。奥行知覚の認知機能のうち、両眼視差による奥行量の弁別実験を行い、奥行知覚の視認性を高める因子である形、輪郭線についての特性を検討した結果からは、視認性の高い形の場合には、形の差や配置方法による奥行弁別への影響は認

められなかった。また、奥行弁別閾が両眼視差角41秒近傍にあることが確認された。また、輪郭線は、視標作成時にエッジ（端面）の機械的な加工精度を高めることで視認性が高まることが確認された。

尚 本研究では、奥行量の評価尺度に視差角度を用いたが、両眼視による奥行弁別には両眼視差の情報が重要であり、その条件の規定方法として「眼から視標までの距離」と「視標間の奥行距離」とが重要な要因であり、両方を規定するには相対角度による表現が適切と考えている。

また、奥行を視差角で表現することの合理性と両眼視差と運動視差を機能を区別して捉えることの有効性を示すことができた。

今後の研究の課題は、今回明らかとなった、錯視率を奥行弁別の評価尺度として、更に有効性を高めるべく、錯視により生ずる誤認や誤答のメカニズムに関する詳細な検討と考察を加えることによって、仮想現実感などに於けるより高度な質感提示の画像表現技法などを考えるきっかけを示すことができるのではないかと推察し期待する。

第3章では、両眼視差による奥行弁別実験を行い、奥行知覚の視認性を安定的に高めた状況下に於ける、テクスチャ刺激と錯視効果に関する研究を行った。

そして被験者を、熟練者と非熟練者とに分けて実験を行うことで、錯視と熟練効果に関する検討を加えた結果、奥行知覚の弁別に限ったテクスチャの刺激情報は、微細なテクスチャ情報のときには視認性を高める効果があるが、テクスチャ刺激が相対比較視標間の奥行量と等しいかそれ以上になると、急速に錯視効果を高めて、極端に視認性を悪くすることが明らかとなった。

すなわち、適度な大きさと質感を有するテクスチャの存在が、奥行知覚認知に於ける視認性向上要因となっていることが確認された。

奥行知覚の認知方法は、テクスチャの部分情報から、その集群情報による観

察へと切り換えることにより、弁別閾が更に低下する過程が熟練者による実験により明らかとなった。そして、熟練者と非熟練者の奥行知覚の認知過程に於ける観察手法の差異が、熟練者の錯視を起し難くしているものと推察された。

また、熟練者の多くが取っている観察テクニックである、適度な大きさと質感を有するテクスチャ情報を、部分観察情報として活用したり、集群観察情報として活用したりする観察方法の切り換えのタイミングや移行方法の習得、すなわち「学習効果」によって錯視を減らすことができる可能性があることが実験の結果から推察された。

すなわち、錯視効果因子に関する研究から、視認性を高めるための視標の材質感（テクスチャ）情報の存在と、その有効な刺激量の程度を明らかにすることができた。

そして、研究の過程から錯視を生じ難い観察方法の提案を行うことができた。

また、被験者の熟練度の差異による観察方法の相違点に注目して熟練者の観察方法を分析研究した結果、非熟練者の弁別能力を高める観察方法と”観察方法の切り換えのタイミング”すなわち、”奥行弁別率の傾向曲線に於ける変曲点”の存在を明らかにすることができた。

第4章では、奥行弁別作業に於ける焦点調節機能に関わる要因の比較実験を通じて、微細領域に於ける奥行弁別に優位な観察方法と視機能訓練の方法について考察を加えた結果、視標が眼の焦点深度内に入った後の注視点の決め方が、調節による奥行弁別精度を高める大きな要因であることが確認された。

また、弁別閾値近傍の僅かな奥行量を識別する場合、7秒以下の注視作業である短時間注視の有効性が明らかになった。そして、10秒以上の注視作業である長時間注視を行った場合には、弁別感度ならびに弁別精度の低下をきたすことが明らかとなった。

すなわち、ヒトの眼の焦点調節時に眼の光学的特性を活用した、奥行弁別能力を高める方法を提案した。そして注視点の決め方が焦点調節を要因とした場合の奥行弁別精度を高める要因と成っていることを明らかにした。また、奥行弁別精度を高めるための短時間注視の有効性を実験によって明らかにすることができた。

次に、微細領域に於けるヒトの眼の焦点位置に関する研究では、睡眠時などの安静位は近視側にあると云われている。また、焦点調節に於ける眼筋の変位量を仮に光学的に1 Diopter 相当動かしても実際には1 Diopter 相当の調節は得られていないと考えられている。すなわち、±1 Diopter 以内の領域に於いては縮瞳などによって焦点位置の補正を行っているか、焦点深度域内のベストフォーカス以外の位置に止まった場合には、その状態のまま注視作業を行ってしまうと考えられている。

今後取り組むべき課題は、これらボケ情報の処理過程の解明と補完機能の解明が必要と考える。

次に、奥行弁別作業に於ける両眼視と単眼視との弁別能力の比較と、利き眼の調節能力の影響についての比較実験の結果からは、両眼視が単眼視より弁別能力が優れていた。また、単眼視に於いては、利き眼、非利き眼に関わらず左眼に比べて右眼の弁別能力が優れていることが考察された。

第5章では、融像機能に関する実験の結果から”融像機能の習熟訓練”とは、多くの場合は、単に眼筋の使い方の”きっかけ”を作る作業で、一度そのコトがつかめると急速に融像が可能となる。あるいは融像力が急速に高まることが明らかとなった。

そして、双眼鏡や実体顕微鏡などの両眼単一視作業に於いて、左右眼の像を融像困難な者でも”眼筋の使い方の訓練不足”を原因とする場合には、両眼に1～2 Prism Diopter( $\Delta$ )づつプリズム強度を付加する方法による眼筋訓練の方法が短

時間で速効性のある訓練方法となることが明らかとなった。

すなわち、両眼単一視に於ける融像困難者の多くを占めていると考えられる”眼筋の使い方の訓練不足”を原因とする場合の融像力訓練として、効果的かつ速効性のある輻輳融像訓練の方法を提案することができた。

そして、ヒトは融像機能に特に障害が無くとも、ヒトそれぞれに異なる生活環境によって、視機能の訓練や習熟の機会の得かた、また、生活における必要性、すなわち生活体験や経験に差があることに起因した訓練の未熟を原因とする輻輳融像に於ける訓練不足が生じている事例が少なくないことを推測させる結果を得ることができた。

このことは、既に実体顕微鏡を使う作業の場に於いて繰り返しの融像訓練が行われていたことから、生活の場に於いては経験的にはある程度理解されていたことではあるが、その融像訓練方法として合理的で効率的な方法を提案することができた。

また、「調節や輻輳は生後6ヵ月前後で習熟訓練によって形成される機能である」とする輻輳に関する従来の考え方の規定や表現方法を「大半のヒトの場合には、調節や輻輳は生後6ヵ月前後で習熟訓練によって形成される機能である」そして「日常生活を営む上で必要な、ある程度の輻輳力や開散力は、生後6ヵ月前後で習熟訓練によって形成される機能であるが、経験する程度に応じて個体差を生ずる機能である」という強度程度を条件として併記すべきではないかと考える。

## 謝 辞

九州芸術工科大学大学院芸術工学研究科生活環境専攻に社会人として在籍して3年間、教授佐藤陽彦医学博士には、指導教官として人間工学的観点から、また人類動態学的観点から学問のご指導を戴きました。

また、恩師佐藤陽彦教授には、学会や研究会を通じて研究者としてのあり方や生き方をも学ぶことができました。

そして、家族を含めた日常生活に於いても、人生の師としてたくさんの教を戴きました。

言葉や文章では感謝の意を表現し尽くせませんが、深く感謝申し上げます。

日本大学教授大久保堯夫医学博士には、製品企画についての仕事に関するご指導やご助言を賜り、現在まで仕事をしながらも奥行知覚の研究を続けるきっかけとその機会をつくって戴きました。

日本大学生産工学部管理工学科人間工学研究室の堀江良典助教授には、ご指導とご助言を戴きました。

九州産業大学芸術学部田中淳教授には、研究のご助言を戴きました。

株式会社ニコンの製品企画設計部門、光学設計部門ならびに品質保証部門の関連担当の諸氏には、実験についてのご助言やご支援を戴きました。

九州芸術工科大学人間工学教室の学部生ならびに院生の諸氏には実験のご支援、ご協力を戴きました。

本論文をまとめることができましたのも、以上の方々と、これまでの研究活動を応援し、ご支援して下さった方々のお陰と心から感謝し御礼申し上げます。

最後に、長い間 仕事と研究という生活を応援してくれた妻 真奈、大学院入学と同じ年に小学校入学と幼稚園入園をして、共に机を並べて頑張っている娘の理菜と朗菜にこの論文を捧げます。

1995年10月



## 参考文献

- Blakemore, C. and Julesz, B., 1971; Stereoscopic depth aftereffects produced without monocular cues. *Science*, 171, 286-288.
- Davson, H., 1962 : *The eye*. Academic Press, 3, 191.
- Dodwell, P. C. and Engel, G. R., 1963 : A theory of binocular fusion. *nature*, 198, 39.
- 福田雅俊, 1966 : 調節. 萩原朗編, *眼の生理学*. 医学書院, 216-219.
- 樋渡涓二 (編), 1986 : *視聴覚情報概論*. 昭晃堂, 63-78.
- 池田光男, 1988 : 眼はなにを見ているか. 平凡社, 32-46, 177-181.
- 笠井健, 1957 a : 眼の焦点調節機構. 応用物理学会 (編), *生理光学*. 朝倉書店, 116-119.
- 笠井健, 1957 b : ピント維持のアルゴリズム. 応用物理学会 (編), *生理光学*. 朝倉書店, 125-126.
- 笠井健, 近藤勝也, 関口稔, 藤井克彦, 1971 : 眼の焦点調節における焦点深度の影響. *医用電子と生体工学*, 9(1), 28-36.
- 川窪秀明, 1993 : 偏側性について. 九州芸術工科大学平成4年度卒業論文, 9-10.
- Macleod, D. and Bannan, R. E., 1973 : Microscopes and eye fatigue. *Industrial Medicine and Surgery*, 42(2), 7-9.
- Marr, D., 1982: *Vision*. W. H. Freeman and Company. 乾敏郎, 安藤広志 (訳) 1989 : *ビジョン*. 産業図書, 241-278.
- Metzger, W., 1953; *Gesetze des sehens*. Waldemar Kramer and Co. 盛永四郎 (訳), 1968: *視覚の法則*. 岩波書店, 217-289.
- 神前正啓, 1978: 輻輳およびAC/A比測定. 三島濟一, 塚原勇, 植村恭夫 (編) *眼科 MOOK No. 3, 眼科一般検査法*, 金原出版, 45-46.

- 宮代信夫, 小柴達美, 丸谷隆明, 横溝克己, 1989 : Microscopic taskにおける  
眼と手の協調とその運動特性について, 人間工学, 25(1), 33-39.
- 中溝幸夫, 斎田真也, 1990 : 運動視差 ; 研究史と最近の研究動向.  
福岡教育大学紀要, 39, 239-264.
- 仁田正雄, 1990 : 眼科学. 文光堂, 46-50.
- Ogle, K. N., 1958: Note on stereoscopic acuity and observation distance.  
Journal of the Optical Society of America, 48, 796-797.
- Ogle, K. N., 1962: The optical space sense. The Eye, 4, Academic Press,  
287, 295.
- Ogle, K. N. and Schwartz, J. T., 1959: Depth of focus of the human eye.  
Journal of the Optical Society of America, 49, 273-280.
- Östberg, O. and Moss, C. E., 1984: Microscope work-ergonomic problems  
and remedies. Proceedings of the International Conference on  
Occupational Ergonomics, Toronto, 402-406.
- Östberg, O. and Swanson, N., 1988 : Visual accommodation when focusing  
targets in 'near' and 'far' areas of a chart containing a distance  
illusion pattern. Proceedings of the 12th International Symposium  
on Human Factors in Telecommunications, The Hague, F. 4, 1-8.
- Robinowitz, M., Bahr, G. F. and Fox, C. H., 1981 : Relieving muscle fatigue  
and eyestrain in microscopy. Acta Cytologica, 25, 585-586.
- Rogers, B. and Graham, M., 1979 : Motion parallax as an independent  
cue for depth perception. Perception, 8, 125-134.
- 斎田真也, 1988 : 運動視差が奥行知覚に果たす役割. 光学 17 (11)  
565-571.

- Schmidt, R, F., (Ed.), 1986: Fundamentals of sensory physiology. Springer Verlag KG. 岩村吉由晃, 酒井英夫, 佐藤昭夫, 豊田順一, 松裏修四, 小野武年 (訳), 1989: 感覚生理学. 金芳堂, 195-203.
- 四宮孝史, 大久保堯夫, 1994: 実体顕微鏡を用いた微細領域における奥行弁別作業と習熟効果に関する研究. 人間工学, 30(1), 41-49.
- 四宮孝史, 佐藤陽彦, 1994: 奥行弁別作業時の単眼視と両眼視に於ける焦点調節の比較. 人間工学, 35 (特別号), 470-471.
- Stark, L. and Takahashi, Y., 1965 : Absence of an odd-error signal mechanism in human accommodation. IEEE Trans. BME, BME-12(3, 4), 138.
- 角居裕史, 1993: 視機能の左右差と利き眼について. 九州芸術工科大学平成4年度卒業論文, 20-21.
- 高野英彦, 1981: 平面図形の認識手法とその応用. 機械技術研究所報告, 113, 67-78.
- 魚住博, 1990: 眼球光学. 西信元嗣 (編), 眼光学の基礎. 金原出版, 130-134.
- Wheatstone, C., 1838: On some remarkable and hitherto unresolved phenomena of binocular vision. Royal Society of London, Philosophical Transactions, 371-394.
- 山本裕子, 1981: 両眼視機能検査の種類とその意義. 三島濟一, 塚原 勇, 植村恭夫 (編), 眼科 MOOK No. 31, 視能矯正. 金原出版, 103-112.