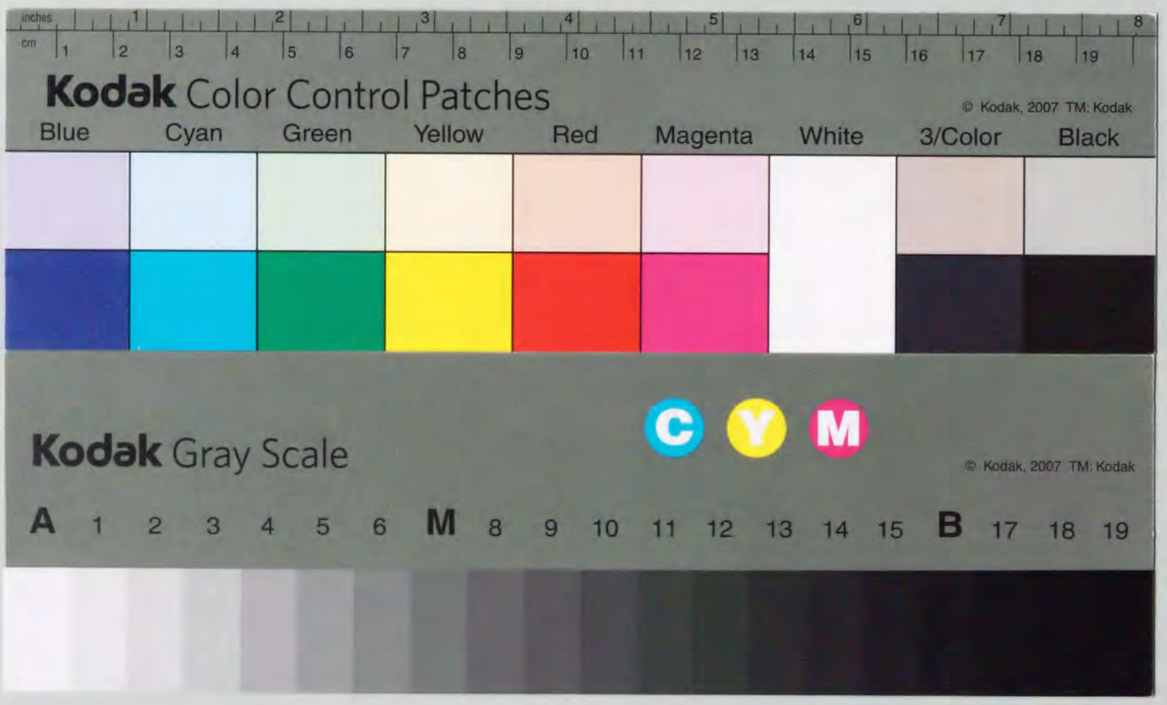
奥行知覚における色の役割

2000年7月

江幸浩等



（千葉大学学位申請論文）

奥行知覚における色の役割

２０００年７月

江草浩幸

目次

第１章　序 ---------- 1

第１節　本論文のテーマ ---------- 1

第２節　視覚系の構造 ---------- 4

第３節　視覚系の活動 ---------- 9

第４節　視覚系の下位経路 ---------- 10

第５節　色覚 ---------- 13

第６節　色の表現 ---------- 20

第７節　奥行手がかり ---------- 22

第８節　大気遠近現象 ---------- 27

第９節　図と地の分化 ---------- 28

第１０節　本論文の構成 ---------- 29

第２章　色の進出後退現象 ---------- 31

第１節　明るさの効果 ---------- 31

１－１　諸研究 ---------- 32

１－１－１　透過光刺激や発光刺激を用いた研究 -------- 32

１－１－２　色紙を用いた研究 ---------- 37

１－１－３　諸研究のまとめ ---------- 40

１－２　実験１ ---------- 41

第２節　明るさの効果が発生するしくみに関する諸説 -------- 42

２－１　過去経験説 ---------- 42

２－２　瞳孔変化説 ---------- 44

２－３　両眼網膜像説 ---------- 45

２－４　見えの大きさ説 ---------- 46
２－４－１　見えの距離に及ぼす大きさの効果 ---------- 46
２－４－２　見えの大きさに及ぼす明るさの効果 ---------- 48
２－４－３　見えの大きさ説の問題点 ---------- 51
第３節　見えの大きさ説の実験的検討 ---------- 52
３－１　実験２ ---------- 53
３－２　実験３ ---------- 53
３－３　実験４ ---------- 56
３－４　実験２、３、４の結果についての考察 ---------- 61
第４節　図－地知覚説 ---------- 61
４－１　Oyama & Yamamura(1960)の報告 ---------- 61
４－２　実験５ ---------- 62
４－３　被験者の内観報告 ---------- 70
４－４　実験５の結果を説明するための図－地知覚説 ---------- 71
４－５　実験６ ---------- 76
４－６　図－地知覚説の一般化 ---------- 79
第５節　図－地知覚説の実験的検討１ ---------- 81
５－１　実験７ ---------- 83
５－２　実験８ ---------- 88
５－３　実験９ ---------- 93
５－４　実験７、８、９の結果のまとめ ---------- 99
第６節　図－地知覚説の実験的検討２ ---------- 99
６－１　新しい進出後退現象の可能性 ---------- 99
６－２　実験１０ ---------- 100
６－３　実験１１ ---------- 104

６－４　実験１０、１１についての考察 ---------- 107
第７節　単眼視の場合の色相の効果 ---------- 110
７－１　諸研究 ---------- 110
７－２　実験１２ ---------- 113
７－３　眼球調節説 ---------- 114
７－４　見えの大きさ説 ---------- 116
７－５　図－地知覚説 ---------- 118
第８節　両眼視の場合の色相の効果 ---------- 119
８－１　諸研究 ---------- 119
８－１－１　黒色背景を用いた研究 ---------- 119
８－１－２　白色背景を用いた研究 ---------- 123
８－１－３　諸研究のまとめ ---------- 123
第９節　色収差説 ---------- 125
９－１　Einthoven (1885)の色収差説 ---------- 125
９－２　Einthoven (1885)説の問題点 ---------- 133
９－３　Vos (1960)の色収差説 ---------- 134
第１０節　色収差説の検証 ---------- 138
１０－１　人工瞳孔位置の影響 ---------- 138
１０－２　明るさレベルあるいは瞳孔径の影響 ---------- 140
１０－３　白色背景での進出後退現象 ---------- 144
１０－４　ランダムドットパタンにおける進出後退現象 --- 146
第１１節　色収差説を否定する研究 ---------- 147
第１２節　Oyama & Yamamura(1960)の結果に対する図－地知覚説の適用可能性 ---------- 148
１２－１　実験１３ ---------- 148

１２－２　実験１４ ---------- 150
１２－３　実験１３、１４の結果についての考察 ---------- 153
１２－４　図になりやすさと色相との関係 ---------- 153
１２－５　図－地知覚説による説明 ---------- 154
１２－６　実験１５ ---------- 155
１２－７　実験１６ ---------- 156
第１３節　色収差説および図－地知覚説の有効性 ---------- 162
１３－１　Oyama & Yamamura (1960)の結果に関して ---- 162
１３－２　両眼視における色相の効果一般に関して -------- 164
第１４節　対象と背景がともに有彩色の場合の色相の効果 --- 165
１４－１　実験１７ ---------- 165
１４－２　見えの大きさ説 ---------- 168
１４－３　図－地知覚説 ---------- 169
第１５節　彩度の効果 ---------- 169
１５－１　諸研究 ---------- 169
１５－２　実験１８ ---------- 170
１５－３　見えの大きさ説、過去経験説および図－地
知覚説 ---------- 175
１５－４　実験１９ ---------- 176
１５－５　図－地知覚説の有効性 ---------- 177

第３章　奥行情報の伝達者としての色 ---------- 181
第１節　等輝度刺激による奥行知覚 ---------- 181
１－１　Livingstone & Hubel (1987, 1988)の報告 ---------- 181
１－２　等輝度ランダムドットステレオグラムによる

両眼立体視 ---------- 188
１－２－１　奥行知覚の消失あるいは劣化の報告 -------- 188
１－２－２　奥行知覚の維持の報告 ---------- 201
１－２－３　まとめ ---------- 209
１－３　等輝度図形ステレオグラムによる両眼立体視 ------ 210
１－３－１　奥行知覚の維持の報告 ---------- 210
１－３－２　奥行知覚の劣化の報告 ---------- 214
１－３－３　まとめ ---------- 222
１－４　等輝度刺激による単眼性奥行知覚 ---------- 223
第２節　等輝度図形ステレオグラムによる両眼立体視の実験的
検討１－反応時間を指標として－ ---------- 228
２－１　実験１ ---------- 228
２－２　実験２ ---------- 235
第３節　等輝度図形ステレオグラムによる両眼立体視の実験的
検討２－奥行が知覚されない輝度範囲を指標として－ 237
３－１　実験３ ---------- 238
３－２　実験４ ---------- 241
第４節　実験１、２、３、４についての考察 ---------- 246
第５節　等輝度条件下での絵画的奥行手がかりに基づく奥行知
覚の実験的検討 ---------- 247
５－１　幾何学的錯視に関する遠近法説 ---------- 247
５－２　等輝度条件下での幾何学的錯視 ---------- 248
５－２－１　Livingstone & Hubel の報告 ---------- 248
５－２－２　他の報告 ---------- 250
５－３　問題点 ---------- 253

5－4　実験5 ---------- 255
5－4－1　CRT 画面の明るさの測定 ---------- 255
5－4－2　錯視の測定 ---------- 259
5－5　考察 ---------- 263

第4章　結語 ---------- 267
第1節　奥行手がかりとしての色 ---------- 267
1－1　明るさおよび彩度 ---------- 267
1－2　色相 ---------- 268
1－3　三属性の働き間あるいは二種の機構間の相互関係 - 269
第2節　奥行情報の伝達者としての色 ---------- 270
2－1　両眼立体視 ---------- 270
2－2　単眼性奥行知覚 ---------- 272
2－3　奥行知覚と視覚神経経路との関係 ---------- 273

要約 ---------- 275

謝辞 ---------- 291

引用文献 ---------- 292

第1章　序

第1節　本論文のテーマ

色と奥行は、ともに、視知覚における重要な属性である。前者は視対象の組成に関係し、後者は視対象の空間的存在位置に関係する。常識的には両者は互いに無関係であるように思われる。ところが、両者は様々な形で密接に関連している。たとえば、視野内のある刺激領域の光学的属性が一定でも、その領域に対して知覚される空間的属性が異なると、知覚される色も異なってくることが知られている。逆に、ある刺激領域の物理的な空間的属性が一定でも、その領域の光学的属性ないし知覚された色によって、知覚される空間的属性が異なることも起こる。本論文では、後者の関わり、すなわち奥行知覚の成立において色が果たす役割について論じる。

ところで、「色」は視対象の知覚的属性を表す語である。しかし、本論文では、知覚的属性だけでなく、そのような知覚を生じさせる刺激、すなわち網膜像の光学的属性を表現する場合にも「色」という語を使うことがある。また、「色」の語で属性の全体を表現する場合と一部を表現する場合とがあるので注意願いたい。刺激光の物理的属性には波長、強度あるいは輝度、純度といった側面があり、それらに対応して、知覚的属性としての「色」は色相、明るさ、彩度という三つの側面（色の三属性と呼ばれる）を持つ。「色」の語が限定的に用いられる場合は、波長と純度、あるいは色相と彩度を合わせたもの指す。そして、それと対をなす語として「明るさ」を用い、知覚的属性としての明るさや物理的属性としての輝度を表す。

奥行知覚の成立において色が果たす役割は二つある。一つは、色自体が直接的に奥行知覚を生み出す、すなわち奥行手がかりとして働くという点である。それは、色の異なる複数の対象が存在する、すなわちそれらの網膜像の光学的属性が互いに異なる場合、対象が作り出す他の刺激属性が全て同一であっても、対象までの知覚的距離に差違が生じうるという形で現れる。本論文の第一のテーマは、色が持つ奥行手がかりとして働きを、現象論的あるいは心理物理学的観点から考察することである。

色の持つ第二の働きは他の奥行手がかりの情報を伝達することである。後に詳しく述べるが、距離や奥行の知覚を生み出す刺激属性、すなわち奥行手がかりの中心をなすのは網膜像の形態的特徴である。本論文の第二のテーマは、色の差異によって作り出された形態的特徴が奥行手がかりとして機能しうるかという問題を、主として情報処理論的観点から論じることである。ただし、ここでは「明るさ」以外の属性としての「色」が問題になる。視覚的情報処理に関する研究では、網膜像の光学的構成のうち、明るさの分布に関連した情報と色の分布に関連した情報とは、少なくとも視覚系の初期段階では、異なる処理の流れの中にあるとする考え方が有力である。そして、明るさの情報や色の情報は各々どのような知覚的属性の生成に利用されているのかという問題が追求されている。たとえば、図１－１のような情報処理の流れが提案されている（Cavanagh, 1989）。このモデルでは、刺激あるいは網膜像（STIMULUS）からまず明るさ（Lum.）と色（Colour）の分布に関する情報が抽出され、それらからさらに両眼網膜像差などに関する情報が抽出されると仮定されている。また、矢印は入力の経路、太さは入力の強さを表しており、上位の属性の処理への寄与は明るさより色の方が弱いと仮定されている。本論文の第二の議論もそのような追求の一環であ

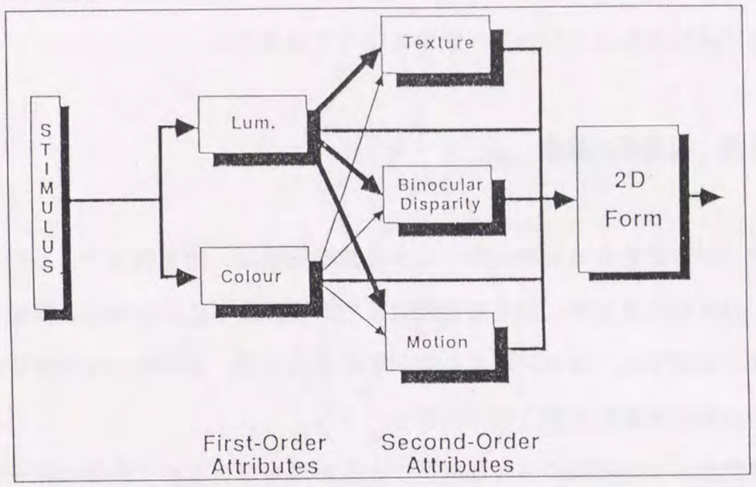


図１－１　視覚系の初期段階における情報処理に関するモデル（Cavanagh, 1989）

る。以下、この章では、視知覚に関する基本的概念のうち、本論文での議論に必要なものについて、簡単に述べておきたい。

第２節　視覚系の構造

我々がものを見る生理的なしくみの初期段階は、感覚器官である眼から大脳皮質の視覚野に至る視覚神経系である。以下にその構造と機能を簡単に解説する。視覚神経系の解剖学的構造は眼、視神経、外側膝状体、大脳皮質視覚野に大別される（図１－２）。

感覚器官である眼の主要な構造は、入射光を屈折させて外界の像を結ばせるための角膜と水晶体、入射光量を調節するための瞳孔、光受容器である視細胞と神経細胞を含む網膜からなる（図１－３）。角膜は眼球の最前面にある透明な膜で、網膜上に外界対象の像（網膜像）を結ぶための光の屈折の大部分は角膜への入射の際に起こる。水晶体は透明なレンズ状のもので、その厚みが変わることによって様々な距離にある対象に対する焦点合わせの機能を果たす。瞳孔は水晶体の前にある色のついた膜（虹彩）の開口部である。そして、眼球後部の内壁は網膜で覆われている。

網膜は細胞の多層構造をなしている。一番奥には視細胞の層があり、一番表の層は神経節細胞からなる。また、両者の間には、水平細胞、両極細胞、アマクリン細胞の層がある（図１－４）。視細胞には桿体と錐体の2種類がある。網膜の中心部には中心窩と呼ばれる凹みがあるが、この部分には錐体のみが密集している。中心窩は注視対象の像が結ばれる部位であり、網膜中で最も解像度が高い。なお、注視対象と中心窩を結ぶ線（図１－３の破線）は視軸と呼ばれる。錐体の密度は中心窩から離

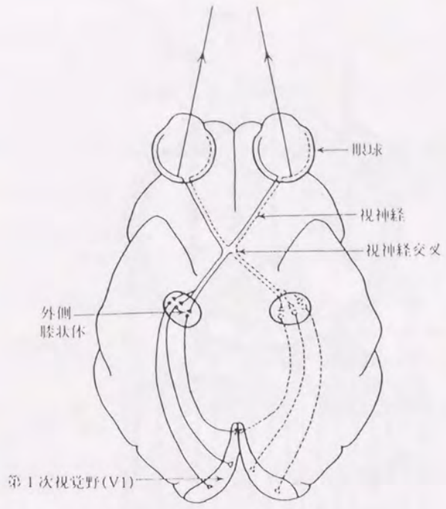


図１－２　視覚神経系の構造

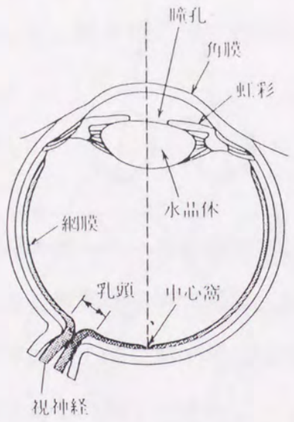


図１－３　眼球の構造

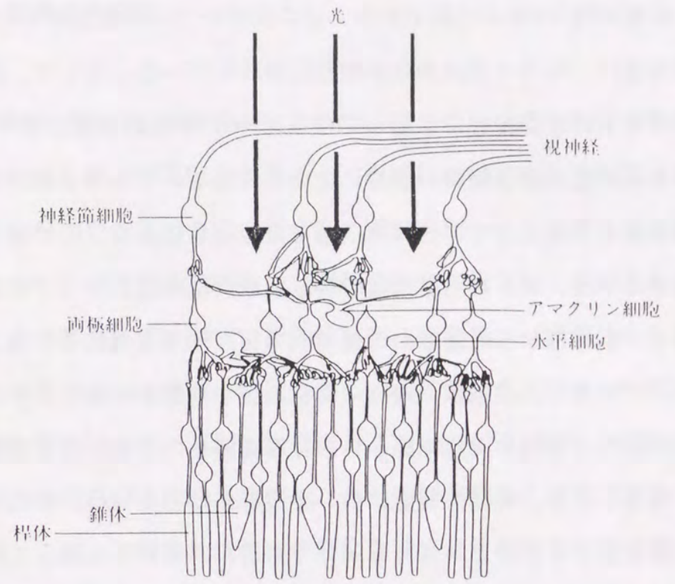


図１－４　網膜の構造

れるにつれて急激に減少する。一方、桿体の密度は網膜周辺部の方が高い。両極細胞は2本の突起を持ち、その内の一方は視細胞からのシナプス接続を受け、もう一方は神経節細胞に接続している。そして、視細胞からの情報を神経節細胞に中継している。1個の神経節細胞に信号を伝達している視細胞の数は網膜の部位によって異なる。中心窩では少なく、高い解像度を可能にしている。周辺部ではるかに多く、光に対する感度を高めている。水平細胞は複数の視細胞や両極細胞とシナプスを形成しており、視細胞から伝達される信号間の相互作用を司っていると考えられる。アマクリン細胞は、複数の両極細胞や神経節細胞とシナプスを形成しており、やはり両極細胞から神経節細胞への信号伝達を調整していると考えられる。神経節細胞は長い軸索を伸ばしている。それらは網膜の表層を通って乳頭と呼ばれる部分で集まり、視神経となって眼球をでる。乳頭の部分には視細胞がなく、刺激は受容されない。

視神経は、視神経交差と呼ばれる部分で二つに別れ、間脳の神経核の一つである外側膝状体で神経接続を行う（図１－２を参照）。網膜の耳側半分から出た視神経は眼と同じ側の外側膝状体の神経細胞にシナプス接続し、鼻側半分からのものは眼と反対側の外側膝状体に入る。視神経からの接続を受けた外側膝状体の神経細胞は同じ側の大脳半球の視覚野に軸索を伸ばし、そこの神経細胞にシナプス接続する。したがって、両眼の網膜の左半分、すなわち視野の右半分の情報は左半球へ、網膜の右半分（視野の左半分）の情報は右半球へまず送られることになる。

視覚野（Ｖ１）は後頭葉の端の大脳皮質にある。その前方には、視覚前野と総称される高次の視覚中枢があり、異なる刺激情報（形、運動、色など）を処理すると考えられる多くの領域（Ｖ２、Ｖ３、Ｖ４、ＭＴ、ＭＳＴなど）に区分される。

第３節　視覚系の活動

視覚神経系における刺激の受容と伝達は以下のようにしてなされる。外部から入射した光が視細胞に届くと、視細胞に含まれる視物質が光を吸収して化学的変化を起こす。すると、視細胞から放出される伝達物質の量が変化し、両極細胞の膜電位（細胞膜内外の電位差）が変化する。さらに、その伝達物質の働きで神経節細胞に活動電位（膜電位の急激な上昇と元のレベルへの復帰）が発生する。活動電位の大きさや持続時間は、刺激に関わりなく、ほぼ一定である。ただ、刺激が強いか持続する場合には活動電位が連続的に発生し、その頻度が刺激に応じて変化する。すなわち、このような活動電位群の頻度が神経系を伝達される信号の実体である。以後、前述の神経経路に沿って発生した信号が伝達されていく。なお、神経細胞によっては、他からの信号を受けていないときにも、一定の割合で活動電位を発生させている。これを自発的活動と呼ぶ。

視覚系の神経細胞は網膜の特定の部位の特定の範囲に光刺激が与えられた時にのみ応答する。この範囲を受容野という。受容野の内、そこへの刺激が当該の神経細胞に興奮性の影響を及ぼす領域をオン領域と呼び、逆に抑制性の影響を及ぼす領域をオフ領域と呼ぶ。ただし、オフ領域に与えられていた刺激が消失すると興奮性の影響が生じる。ここでいう興奮とは神経細胞の活動電位の発生率が自発性活動のレベルより高くなることであり、抑制とはより低くなることである。

また、神経細胞は応答様式によっても区別される。一つは、受容野への刺激が続く限り応答し続けるもので、持続型と呼ばれる。もう一つは、刺激が変化した後の短い間だけ興奮し、その後自発的活動レベルに戻る

 もので、一過型と呼ばれる。したがって、持続型の神経細胞は網膜像の種々の部分の定常的な属性（色、明るさなど）を検出し、一過型の神経細胞は運動や変化を検出する働きを持つと考えられる。

ヒューベルとウィーゼルは、ネコやサルの視覚野や視覚前野の単一の神経細胞の電気的活動を調べる一連の研究を行い（たとえば、Hubel & Wiesel, 1968）、網膜への刺激に対する応答特性の違いから神経細胞を単純、複雑、超複雑の三つのタイプに区別した。これらの神経細胞は、一般に細長い形の受容野を持っており、刺激が静止している場合より特定の方向に運動する場合の方が応答が強い。単純細胞の受容野は細長い帯状のオン領域とオフ領域が隣接したものである。そして、単純細胞は受容野の軸と一致する向きの境界や線状の刺激に強く応答する。しかも、細胞によって応答しやすい刺激の傾きが異なる。複雑細胞の受容野は単純細胞より広く、内部をオン領域とオフ領域に分割することができない。単純細胞が網膜上の特定の部位にある境界や線分に応答するのに対して、複雑細胞は、それらの刺激が広い範囲のどこにあっても応答する。ただし、刺激の傾き関しては、単純細胞と同様、限定されている。超複雑細胞は前二者よりさらに特殊なタイプの刺激に応答する。たとえば、特定の傾きと長さを持つ境界、線分、角などである。これらの3種の神経細胞は、境界、線分、角など、複雑な形の基本的な構成要素と考えられるものに応答するので、特徴検出器と呼ばれる。

第４節　視覚系の下位経路

近年の神経科学の進歩は著しいものがあり、視覚神経系についても多くの知見が蓄積されている。そして、解剖学的および神経生理学的研究

から、視覚神経系には互いに独立した二つないし三つの下位神経経路が存在することが示されている。それらは神経細胞間の連絡に関して分離しているとともに、刺激に対する応答特性もはっきり異なっていて、それぞれが異なる種類の知覚の成立に関わるものと考えられる（Livingstone & Hubel, 1987, 1988 。図１－５を参照）。

一つは、網膜の大型の神経節細胞あるいは外側膝状体の大（magno ）細胞層に端を発し、大脳皮質の視覚野（Ｖ１）の４Ｂ層やＶ２野の太い縞（thick stripe）領域を経由してＭＴ野に至る経路で、Ｍ経路（magnocellular pathway）と呼ばれることがある。この経路の神経細胞は、応答が速く一過的、刺激の運動に敏感でその方向に選択的に応答する、両眼視差に選択的に応答するといった性質を持ち、頭頂葉の連合野に信号を送っている。そして、この経路は運動や奥行の知覚、あるいは対象の空間的定位の機能を担っていると考えられる。また、この経路の神経細胞は、刺激の明るさの差異には敏感に応答するが、色には非選択的に応答する。したがって、刺激の中の明るさが同じで色のみ異なる領域の境界は検出できないことになる。すなわち、色の差異のみで構成された刺激パタンに対しては運動や奥行の知覚が生じないことが予想される。

第二の経路は、小型の神経節細胞あるいは外側膝状体の小（parbo ）細胞層に端を発し、視覚野のブロブ間（interblob ）領域、Ｖ２野の薄い縞（pale stripe ）領域を経由するもので、Ｐ経路（parvocellular pathway）と呼ばれることがある。この経路の細胞は、受容野が狭い、刺激の傾きに選択的に応答する、刺激の角や線の末端に応答するなどの性質があり、形の知覚に関与すると考えられる。

第三は、視覚野のブロブ（blob）領域やＶ２野の細い縞（thin

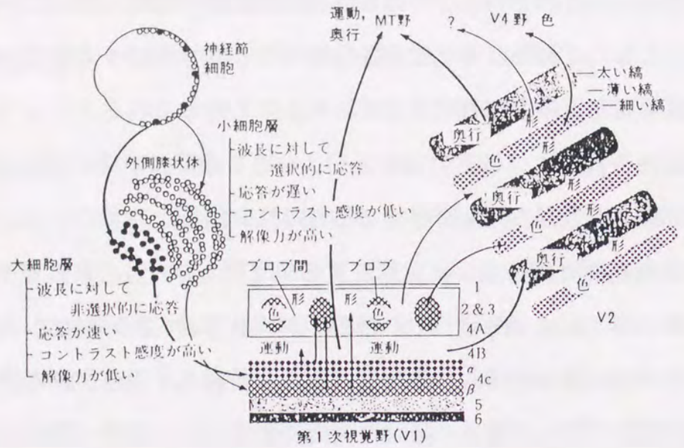


図１－５　視覚神経系の機能区分（Livingstone & Hubel, 1988）

stripe ）を経由してＶ４野に至る経路で、ＰＢ経路（parbo-blob pathway）と呼ばれる。この経路の細胞には刺激の色（波長）に対して二重拮抗的な応答を示すものがある。たとえば、受容野の中心部への赤光刺激に対してはオン、緑光に対してはオフの応答を示し、受容野の周辺部への刺激に関してはこの関係が逆になるといったものである。また、Ｖ４野からは側頭葉の下部へ信号が送られており、この経路は色の知覚に関与すると考えられる。第二、第三の経路は対象の同定に関わるものともいえる。

第５節　色覚

感覚器官に受容され、感覚系を活動させる物理的エネルギーを刺激というが、視覚系にとっての刺激は波長が約400～700nm の光である。そして、刺激光の波長の違いは、知覚上では色相の違いとなって現れる。虹の7色として知られているように、波長が長くなるにつれて、知覚される色は紫から青、緑、黄、赤と連続的に変化する。

色を知覚するしくみについては、二つのの有力な説、すなわち三色説（trichromatic theory）と反対色説（opponent-color theory）が対立してきた。三色説は、この理論の確立者にちなんで、ヤングーヘルムホルツ（Young-Helmholtz ）説とも呼ばれる。この理論では、視覚系には網膜の地点ごとに3種の色知覚機構が存在し、それらが活動すると各々赤、緑、青の知覚が生じると仮定されている。複数の機構が同時に活動すると、その組合せや活動の強さの比に応じて様々な色が知覚される。たとえば、赤機構と緑機構とが同等に活動し青機構が活動しなければ黄が知覚され、三つの機構の活動が均衡する場合は白（無彩色）の知覚が生じる。これ

らの機構の活動レベルは、受容される刺激が強いほど高く、かつ刺激の波長によって異なる。また、最も強く応答する波長は機構によって異なり、赤機構は長波長の光に、青機構は短波長の光に、緑機構はそれらの中間の波長の光に対して感度が高い。この理論は等色実験（ある波長構成の光と同じ色に見える別の波長構成の光を求めること）の結果をうまく説明する。しかし、赤と緑の混ざったものであるはずの黄が混じりけのない純粋な色という印象を与えること、後述の二色型色覚者が白や黄を見ること、あるいは残像や色の対比において赤と緑、黄と青が対になって現れることなどの現象的経験の説明に難点がある。

反対色説もまた、最初の提唱者にちなんで、ヘリング（Hering）説と呼ばれることがある。この説では、刺激の波長に応じて、正、負、ゼロのいずれかの活動状態をとる、3種の色知覚機構を仮定する。一つは明るさの知覚を生み出すもの（白－黒機構）で、残りの二つが色の知覚を生み出す。一方は、正の活動が赤の知覚に対応し、負だと緑の知覚が生じるものであり（赤－緑機構）、もう一方は、正の活動が黄の知覚を、負の活動が青の知覚を生じさせるものである（黄－青機構）。ただし、活動の符号と知覚される色との対応は任意である。また、活動の強さは刺激の強さに依存する。両方の機構が同時に活動する場合は、活動の強さの比に応じて様々な色が知覚される。ただし、赤と緑、あるいは黄と青の知覚が同時に生じることはないから、それらの混合色は知覚世界には存在しない。どちらか一方がゼロの状態の場合は、他方の活動のみで知覚される色が決まる。したがって、この時知覚される色は混じりけのない純粋な色（ユニーク色と呼ばれる）であり、そのような色は黄を含めて4色あることになる。両方の機構ともゼロの状態だと、第三の機構の活動だけが残り、無彩色が知覚される。反対色説は、三色説では説明しにくい、色の見え方に関する様々な事実をうまく説明することができる。

どちらの色覚理論も各々適合する現象を持っている。しかも、神経生理学的研究によって、視覚系の中に三色説的な活動を示す部分と反対色的な活動を示す部分の両方が存在することが明らかにされている。たとえば、網膜の錐体には分光感度の異なる3種のものがあり、感度が最大になる波長が長い方から順にＬ（long-wavelength-sensitive）錐体、Ｍ（medium-wavelength-sensitive）錐体、Ｓ（short-wavelength-sensitive）錐体と呼ばれる（図１－６）。また、外側膝状体の神経細胞には、刺激光の波長に対して拮抗的（反対色的）に応答するものがある。すなわち、赤（青）光の場合には興奮し、緑（黄）光では抑制される、あるいはその逆といった具合いである。また、波長に関わりなく興奮または抑制を示す細胞もある（図１－７）。したがって、現在では、両者を組み合わせた段階説（stage theory）が主流になっている（図１－８）。この種の理論では、視覚系の低次のレベルに三色説的な機構があり、より高次のレベルに三色機構からの入力信号を反対色説的な出力信号に変換する機構があると考える。たとえば、Ｌ錐体とＭ錐体の出力の差やＬ、Ｍ両錐体の出力の和とＳ錐体の出力との差を出力する機構が仮定される。これらの機構は色チャンネルと呼ばれることもある。さらに、それらとは別に、ＬおよびＭ錐体の出力、または3種の錐体全ての出力を加算した明るさの信号を伝達する機構（明るさあるいは輝度チャンネル）を仮定している。また、段階説には、反対色機構を複数の段階に分ける考え方もある。たとえば、De Valois & De Valois（1993）は、視覚系における神経細胞の受容野の特性や細胞間の解剖学的接続構造の知見に基づいて、二つの段階に分けている（実際は三つであるが、最後の段階は省略する）。彼らは、Ｐ系の水平細胞から外

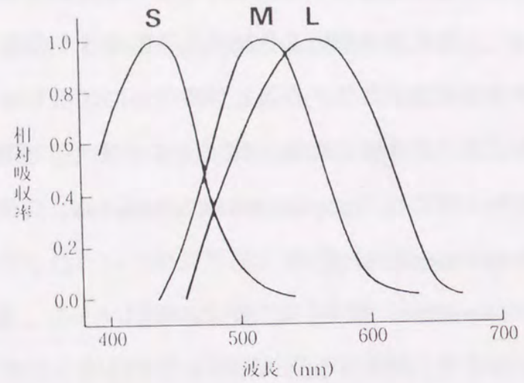


図１－６　ヒトの錐体の吸収スペクトル（Wald & Brown, 1965）。S、M、Lは錐体の種類を示す。

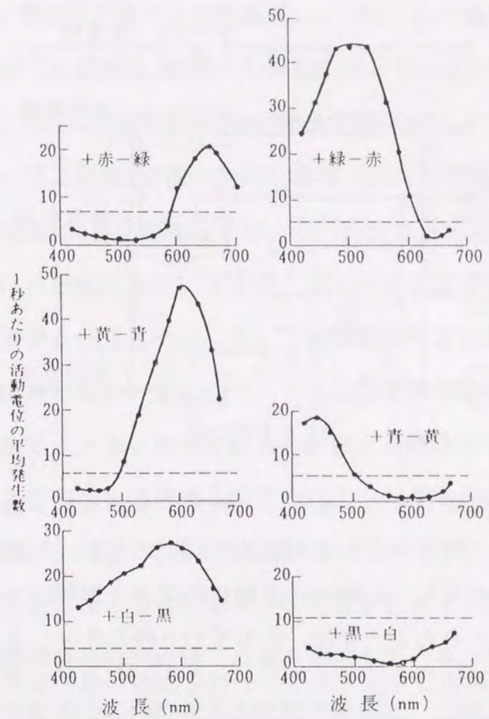


図１－７　サルの外側膝状体細胞の反対色応答（De Valois & De Valois, 1975）

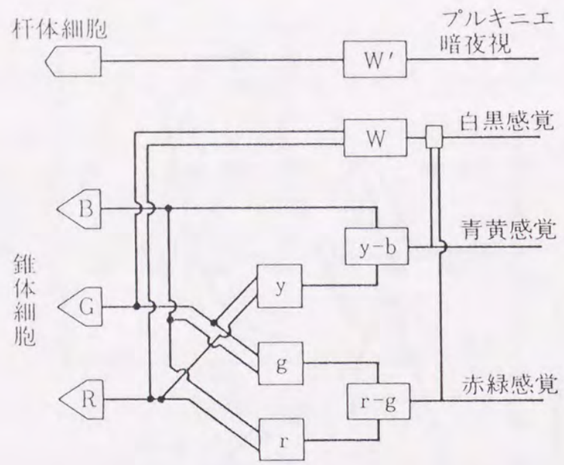


図１－８　段階説モデル（金子, 1988）。ｙ、ｇ、ｒは、それぞれＬ錐体（図中のＲ）とＭ錐体（図中のＧ）、Ｍ錐体とＳ錐体（図中のＢ）、Ｌ錐体とＳ錐体の出力を加算するしくみを表す。ｙ－ｂとｒ－ｇは、それぞれＳ錐体とｙ、ｇとｒの出力の引き算のしくみであり、それら出力が色の知覚を生じる。また、ＷはＬ錐体とＭ錐体の出力を加算しており、ＷとＷ’の出力が明るさの知覚を生じる。

側膝状体に至る経路に、3種の錐体の出力の和と各錐体の出力との差を出力する、第一段階の3種の反対色機構L_0、M_0、S_0（出力の符号が逆のものも考えるので、実際には6種）を仮定する。そして、外側膝状体以上のレベルに、L_0とM_0の出力差（L_0-M_0またはM_0-L_0）とS0の出力との和を出力する、第二段階の2種の反対色機構（出力の符号が逆のものも考えるので、実際には4種）を仮定する。この経路は色の変化に応答するが、輝度の変化には応答しない。さらに、この段階には、L_0とM_0の出力の和を出力する機構も仮定されている。この経路は輝度の変化に応答し、色の変化には応答しない。すなわち、Ｐ系には輝度情報を伝達する部分もあることになる。一方、M経路にもＬ錐体とＭ錐体の和を出力する機構、すなわち輝度情報の伝達機構を仮定しており、知覚される明るさはこれら2種の輝度情報の和に対応するとしている。

第１節でも述べたように、多くの研究者が色チャンネルと明るさチャンネルは別個の情報処理経路であると仮定している。その根拠としては、たとえば、視覚系の空間解像度や時間解像度が、色の変化する刺激と明るさの変化する刺激とで異なることが挙げられる（時間解像度の差違については次節を参照）。また、網膜上の同じ位置において、白黒の矩形波縞と明るさの等しい緑と赤の矩形波縞とに対して、大きさに関する逆方向の継時対比が同時に生じうることが報告されている（Favreau & Cavanagh, 1981）。たとえば、太い白黒縞と細い赤緑縞とを交互に提示して順応させた場合、後に提示される白黒のテスト縞は細く、赤緑のテスト縞は太く見える。この事実もまた、色の情報処理と明るさの情報処理との独立性を示している。

また、上記のような色覚機構が全て備わっている場合は三色型色覚と呼ばれる。この場合、3種類の光を適当な強度比で混合すれば、任意の光

と同じ色に見える。ただし、混合比が平均値からずれる型があり、異常三色型色覚と呼ばれる。この場合、3種の錐体のどれか一つに機能障害（感度の低下など）があるものと考えられる。錐体が2種類しかないなど、色覚機構に欠損がある場合、二色型あるいは一色型色覚と呼ばれる。二色型色覚の場合は2種類の光の混合で任意の光と等色できる。したがって、三色型色覚では異なる色に見える（混合光でいえば、2種の成分光の割合が同じだが第3の成分光の割合が異なる）のに、二色型色覚では同じ色に見える光の群（混同色）が何通りも存在する。さらに、欠損の性質の違い、あるいは等色のための混合比や混同色の違いによって、異常三色型色覚や二色型色覚は三つのタイプ（第一、第二、第三）に分類される。一色型色覚の場合は、強度が同じ光は、分光組成が異なっていても、全て同じに見えてしまう。すなわち、知覚的属性は明るさしか存在しない。

第6節　色の表現

本論文では刺激の色を独立変数とした実験のデータを根拠として議論が進められる。したがって、実験の再現性のために刺激の色が正確に表現されねばならない。色の表現方法（表色系）には様々な種類があるが、一つは、当該の刺激が生じる知覚的属性を数値化し、その数値で刺激としての物体表面の色を表現する方法である。その代表的なもので、本論文でもしばしば登場するのがマンセル表色系である。この表現体系では、先に述べた色の三属性にほぼ対応するヒュー、バリュー、クロマと呼ばれる3個の記号および数値で物体表面の色を表す。たとえば、暗く濃い赤に見える刺激が5R 3/10（5R がヒュー、3がバリュー、10がクロマ）などと表示される。

もう一つは、3種類の基準光（通常は赤、緑、青光が用いられる）を適当な強度比で混ぜ合わせれば、任意の分光特性を持つ対象光と同じ色に見せることができるという、三色型色覚者の等色実験の結果に基づくものである。言い換えると、混色される3種の基準光の相対的強度の値で、全ての色が表現できるということである。この相対的強度は三刺激値と呼ばれる。実際には3種の基準光の単純な混合では等色できない光もあり、対象光に基準光の一つを混ぜた光と残りの基準光の混合光とが等色される。この場合は三刺激値の一つが負の値で表現される。ただし、負の値は不便なので、全てが正の値になるように変換された三刺激値が用いられている。なお、この三刺激値の内の一つの値は明るさの属性を表すように定義されている。また、三刺激値をさらに変換して、明るさ以外の属性を表現する2個の数値にした色度が色の表現によく用いられる。色度を二次元の直角座標として種々の色を位置づけたグラフを色度図と呼ぶ。また、色度図上で二色型色覚の混同色の位置を結んだ線を混同色線といい、理論的には直線となる。

第3章では刺激の明るさを等しくすることが実験や理論的議論の上で重要になる。そして、明るさの等しい状態の表現に「等輝度」の語を用いる。本来、輝度は、人間の眼の標準的な分光感度で補正された、光刺激の物理的明るさを表す量である。しかし、本論文では「等輝度」の語をより一般的な意味での明るさが等しいことを表すのに用いる。刺激間の明るさを等しくする方法はいろいろある。たとえば、先に述べた狭義の輝度を測定し、その値が等しくなるように刺激間の相対的エネルギーを調整してやればよい。あるいは、刺激の知覚的明るさが尺度化されている場合には、その値（たとえば、マンセルバリュー）が等しい刺激を選ぶ。人間が直接見比べて、同じ明るさに見えるように刺激間の相対的

強度を調整する方法もある。ただし、この方法では、分光分布の異なる、すなわち違う色に見える刺激間の比較は難しい。より間接的ではあるが、色の異なる刺激間の明るさを等しくするのに適した方法に交照法がある。分光分布の異なる光を同じ場所に交互に提示すると、交替頻度が低い場合は色や明るさの変動、ちらつきが知覚される。しかし、交替頻度を上げていくと、色のちらつきが消え、明るさのちらつきだけが残る。交照法では、そのような交替頻度で刺激間の相対的強度を調整し、明るさの変動が最小になった状態を明るさの等しい状態と定義する。また、判定の基準に刺激領域間の境界の見えの明瞭さを用いるのが MDB 法（minimally distinct border method）である。この方法では、分光分布の異なる領域を隣接させ、領域間の相対的強度を調整し、境界が最も不明瞭になった状態を明るさの等しい状態と定義する。その他にも、何らかの知覚的属性が最も不明瞭になる（たとえば、運動刺激の見えの速さが最も遅くなる）領域間の相対強度を求めるやり方がある。

第７節　奥行手がかり

我々の眼に映る外界の像、網膜像は二次元の広がりである。それなのに、なぜ、あるいはどのようにして三次元の世界が知覚されるのか、という問題は、心理学の誕生以前から多くの人々の関心を集めてきた。そして、現在の考え方の一つは、刺激としての網膜像や眼筋の活動などが持つ、ある種の特徴を基にして世界の三次元構造が心的に推論あるいは復元されるというものである。対象までの距離や対象の奥行（あるいは対象間の奥行方向の間隔）についての情報を与える、そのような特徴は、総称して奥行手がかりと呼ばれる。

奥行手がかりになりうる刺激特徴としては様々なものが知られている。それらのうち、静的な単眼網膜像に含まれるものは絵画的奥行手がかりと呼ばれる。代表的なものとしては、線遠近法パタン、きめの勾配、相対的大きさ、重なり（遮蔽）などを挙げることができる（図１－９）。線遠近法パタンは、図中の a のような一点に向かって収束する線分群であり、線分間の幅が狭くなるほど遠くにあるという知覚を生みうる。きめの勾配は、b のようなある方向に向かって徐々に分布密度が増していく要素群であり、密度が高い領域ほど遠いという印象を与える。相対的大きさとは、c のような形が類似して大きさの異なる複数の対象の配置を指し、大きい対象ほど近く見えるという効果を生む。重なりとは、d のように、隣接する2領域のうち、一方の境界あるいは輪郭がなめらかに連続しているのに対して、他方では急激な方向変化が存在するパタンを指し、なめらかな境界（輪郭）を持つ領域がより近く見える。また、色の段階的変化（彩度の漸次的低下など）や輪郭あるいは細部の明瞭度の漸次的低下を絵画的奥行手がかりに加える教科書も多く、大気遠近法手がかりと呼ばれる。これら絵画的奥行手がかりの機能は、生得的なものでなく、他の生得的な奥行手がかりによる奥行感との連合学習により獲得されたものと見なされることが多い。

動的な単眼網膜像に含まれるものに運動視差がある。これは、観察者の身体運動に連動して、ある領域が一定の規則に従って連続的に変形したり、構成要素間の相対的な位置関係が連続的に変化したり、あるいは要素の移動速度に空間的勾配が生じる場合を指し、立体や要素間の奥行の知覚を生じさせうることが知られている。要素が多数あり、視野の広い範囲を覆うような場合はオプティカルフロー（optical flow）と呼ばれることがある。また、静止した観察者に同様な刺激パタンが与えられて

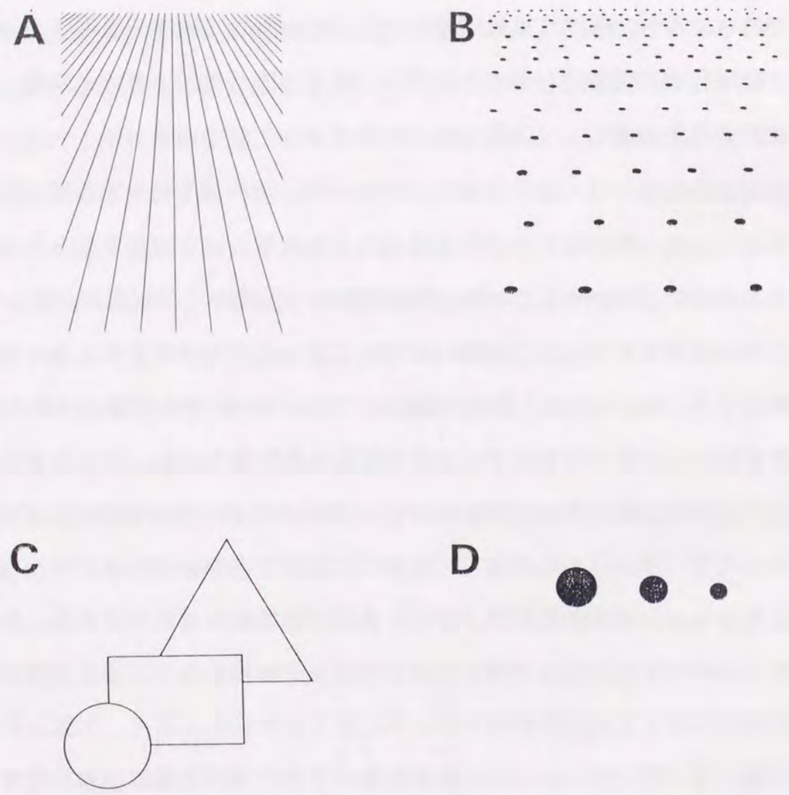


図１－９　絵画的奥行手がかりの例。Ａは線遠近法、Ｂはきめの勾配、Ｃは重なり、Ｄは相対的大きさの例である。

も奥行感が生じる場合のあることが知られており、運動奥行効果（kinetic depth effect）と呼ばれる。

両眼の網膜像がそろった場合に利用可能になる手がかりに両眼網膜像差がある。我々の左右の眼は対象を異なる方向から見るため、対象が立体であったり複数の対象が観察者から異なる距離にあると、左右の眼の網膜像は異なったものになる。この差違が両眼網膜像差であり、物理的な奥行が増すほどその程度は大きくなる。注視対象より近くにある対象が生み出す網膜像差は交差網膜像差、遠くにある対象が生み出す網膜像差は非交差網膜像差と呼ばれる。そして、両眼網膜像差に基づいて成立する奥行知覚は両眼立体視と呼ばれ、一定の範囲内で網膜像差が大きいほど見えの奥行は増す。また、実際の三次元的な対象の配置を見せるのではなく、両眼網膜像差を生じるような、一部のみ異なる2枚の平面画像を左右の眼に別個に提示する場合にも、両眼像の融合（両眼単一視）が成立すれば奥行が知覚される。この場合、平面画像をステレオグラム（stereogram）、提示用の光学装置を実体鏡（ステレオスコープ、stereoscope）と呼ぶ。図１－１０のａは図形あるいは輪郭線ステレオグラムと呼ばれる。この場合、形態的構造が明瞭で、左右のステレオグラムの構成要素間の対応関係が、したがって網膜像差が一義的に決まる。図１－１０ｂはランダムドットステレオグラムと呼ばれる。この図はステレオグラム中央の正方形部分に含まれる構成要素（ドット）を、左側のステレオグラムでは右に右側のステレオグラムでは左に、数ドット分一斉にずらしたものであるが、理論的には要素間の対応関係は多義的であり、局所的には様々な網膜像差が成立可能である。前者のようなステレオグラムによる奥行知覚は局所的両眼立体視（local stereopsis）、後者のようなステレオグラムによる奥行知覚は全体的両眼立体視

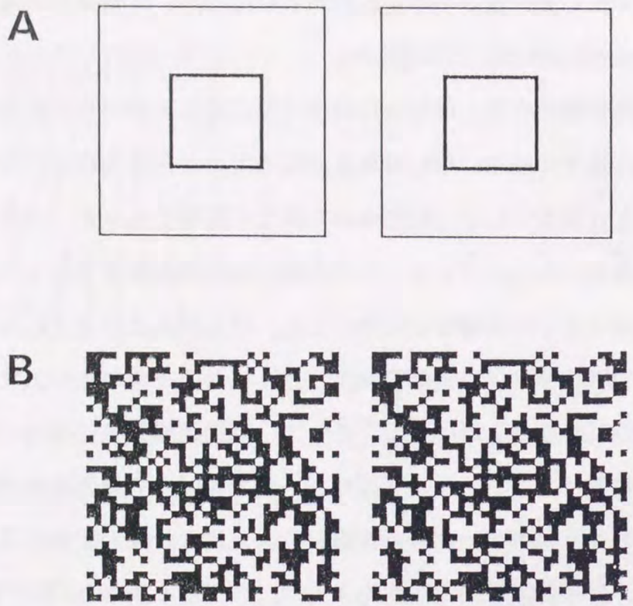


図１－１０　ステレオグラムの例。ランダムドットステレオグラム（B）はJulesz（1971）の図5. 4-3（p. 156）。Aでは内側の正方形に、Bでは中央の正方形の領域に交差網膜像差が与えられている。したがって、これらをステレオスコープを通して観察し、両眼立体視が成立すると、Aでは内側の正方形が外側の正方形より手前に浮き出して見え、Bでは中央の正方形部分が周囲から手前に浮き出して見える。

（global stereopsis）と呼ばれ、両者は異なる機構に基づくと言われる。

網膜像以外の情報源に眼筋の収縮・伸張に関連したものがある。単眼性のものとしては調節の手がかり、両眼性のものとしては輻輳の手がかりがある。調節は、明瞭な網膜像を結ぶために、対象までの距離に応じて眼の水晶体の厚み（屈折率）を変えることを指す。近い対象を注視する場合には毛様体筋が収縮して水晶体の厚みが増し（屈折率が増し）、遠い対象を注視する場合には毛様体筋が弛緩して水晶体は薄くなる（屈折率は減少する）。輻輳は、注視対象の両眼融合を実現するために、内側直筋および外側直筋によって両眼球が協応的に内転または外転することを指す。対象が近くにあるほど内転の度合いは大きくなる。調節、輻輳ともに注視対象までの距離に対応した動きであるから、何らかの形で距離・奥行知覚のための情報を提供している可能性がある。

第８節　大気遠近現象

ある風景を眺めていて視線を遠くの方へ移していくと、事物の色合いはしだいに淡くなり、周囲とのコントラストが低下していくことに気づくであろう。そして、さらに遠方になると、山々の眺めに見られるように、細部が区別できなくなり、青みを帯びた一様な色の広がりになってしまう。このような距離にともなう色の変化は、大気遠近現象（aerial perspective）と呼ばれ、大気による光の吸収と散乱によって起こる。すなわち、対象から発して観察者に向かう光は途中で吸収・散乱されて弱まり、一方で大気によって散乱された別の光（主として青く見える短波長光）が重なるが、その程度は遠方の対象ほど著しい。その結果、上記のような色の見えが生じることになる。

先に述べた大気遠近法手がかりの機能は、このような物理的距離の変化にともなう対象の色の変化についての経験を通して成立すると言われる。すなわち、対象の物理的配置は同じでも、色が変化すると見えの距離が変化するようになる。たとえば、上記の色の変化の仕方は大気の性質によって異なるので、同じ風景を眺めても、その時々の大気の状態によって距離感が異なるということが起こる。同じ風景でも、大気が澄んでいる時には、遠方まで色鮮やかに細部までくっきりと見えるので、距離が過小評価される。逆に、靄がかかっているような場合には、色はくすみ、コントラストが低下するため、距離感が増すのである。

第９節　図と地の分化

我々の視覚系は、刺激の絶対的な性質よりもむしろ刺激の変化あるいは刺激間の相対的な関係に対して敏感である。それどころか、刺激パタン内に全く空間的差異や時間的変化が無い場合には知覚そのものが生じない。たとえば、視野全体にわたって光刺激の強度と波長が一様である場合（全体野、Ganzfeld）、初めは色づいた空間が知覚されるが、直に視野は、色味を失って、一様な灰色になるか暗黒になる。また、全体野においては、知覚が成立する場合でも、「もの」あるいは「図（figure、一定の形をした硬い表面を持ち、存在する位置が明瞭な対象）」は知覚されず、三次元の漠然とした等質の広がり、たとえば霧がかかったような空間が知覚される。視野内に光の強度や波長が異なる複数の領域が存在する場合に初めて、そのどれかが「図」として知覚され、それと境を接する他の領域が「図」の背後の広がり（地、ground）として知覚される。言い換えると、図は地よりも近い位置にあるように知覚される。

これを図と地の分化（figure-ground segregation ）と呼ぶ。

通常は、隣接する領域の両方が同時に図または地の性質を帯びることはない。その際、どの領域が図になるかについては、ゲシュタルト心理学者達によって様々な規則性が報告されている。たとえば、他の領域によって囲まれた領域は図になりやすく、小さい領域ほど図になりやすい。図になりやすさが領域間で均衡している場合には、両者が交替で図になるということが起こる。このような刺激パタンは反転図形と呼ばれる。たとえば、ルビンの盃と呼ばれる図１－１１では、同じ図形が、明るい部屋を背景として向かい合う二人の人物の横顔のシルエットとも見えるし、暗い部屋を背景とした白い盃とも見える。

第１０節　本論文の構成

第２章では、色の持つ奥行手がかりとしての働きを取り上げる。その際、色の属性ごとに、奥行手がかりとして有効性、働き方の特徴、働きが成立するしくみを検討する。特に、明るさが距離・奥行知覚に影響するしくみについて独自の仮説を提唱し、その有効性を実験的に検討する。さらに、その仮説を拡張して色相や彩度の働きへの適用を試みる。

第３章では、奥行情報伝達の働きを取り上げる。まず、両眼立体視と単眼性奥行知覚における色の役割について、過去の諸研究を概括して対立点を明らかにする。次ぎに、色の差異のみで構成された、すなわち等輝度の図形ステレオグラムによる両眼立体視の特性を測定し、局所的立体視機構における色情報の役割を検討する。さらに、奥行手がかりを含む等輝度の幾何学的錯視図形の錯視量を量ることによって、間接的に、色が絵画的奥行手がかり情報を伝達しうるかどうかを検討する。

図１－１１　ルビンの盃

第２章　色の進出後退現象

色の進出後退現象とは、観察者から等距離にある対象でも、その色によって異なる距離に知覚されるという現象を指す。このような色と距離感との関係には古くから関心が向けられてきた。それは主として、画家による、絵画における奥行表現技法の探求であった。たとえば、Leonardo da Vinci の手記にこのテーマに関する記述が見られる。また、画家ではないが、Göthe(1810)も色が与える距離印象についての記述を残している。たとえば、「高い天空、遠い山が青く見えるように、青い面は我々から退いて見える」、「我々は好んで青を見るが、それは青が迫らず、退くからである」、「黄赤色の面を凝視すると、色は実際に器官を穿つように思われる」などと述べている。

色の進出後退現象は、古くは advancing and retreating（receding）colors などと呼ばれたが、最近は color stereoscopy あるいは chromostereopsis と呼ばれることが多い。ただし、前者を進出色・後退色、後者を色立体視と訳し、異なる現象を指す語として用いようとする向きもある（たとえば、東山，1994）。すなわち、両眼視する際に眼球内の色収差によって生じる両眼網膜像差が見えの奥行の原因である場合を色立体視、それ以外の色の奥行効果を進出色・後退色と呼ぼうというわけである。

以下、色の三属性別に、距離・奥行知覚への影響とその影響の生じるしくみを検討する。

第１節　明るさの効果

1－1　諸研究

距離知覚に対する明るさの効果の存在については、多くの研究が肯定的な結果を示している。以下にそのような研究を紹介する。

1－1－1　透過光刺激や発光刺激を用いた研究

明るさの効果に関する最初の組織的な研究はAshley（1898）によってなされた。彼は、被験者に背後から照明された半透明スクリーンを細い筒を通して単眼で観察させ、照明強度を連続的に変化させて、距離感の変化を生じるのに必要な照明強度の変化量を測定した。照明をある程度以上強めるとスクリーンが近くなったと感じられ、弱めると遠くなったと感じられた。水平の細い隙間から両眼で観察させた場合も結果はほぼ同じであった。また、両眼視の実験は様々な刺激布置を用いてなされた。たとえば、被験者から44インチの距離にある黒い衝立に開けた幅1インチの垂直の隙間を紙で覆い、背後からの照明強度を変化させた。あるいは、被験者から40インチの距離に幅が約0.5インチの細い棒を立て、さらに後方には黒い背景を置いて、棒に対する照明強度を変化させた。また、2本の棒を被験者から31インチと52インチの距離に提示して一方の棒の照明を変化させたり、あるいは被験者から2フィートの距離に棒を立て、その56インチ後方にある線状の透過光刺激の明るさを変化させたりして、両対象間の奥行の変化を報告させた。いずれの条件においても、対象の明るさの増加は見えの距離の減少を、明るさの減少は見えの距離の増加をもたらすことが示された。また、明るさの変化に伴う見えの距離の変化は対象の物理的距離を逆方向に変化させることで相殺できることも示された。

我が国では大山・暈（1934）が発光刺激を用いた実験を行った。彼らは、波長や輝度の異なる2個の白熱電球または2本の棒状のネオン管を左右に並べて暗室内に提示した。被験者は、2～14mの様々な距離から両眼で観察し、二つの対象が同じ距離に見えるように、物理的等距離の状態で進出して見える対象の距離を調整した。そして、対象間の位置のずれが計測された。その結果、対象の波長が同じで輝度が異なる場合は、より輝度の高い対象が進出して知覚されることが示された。

Coules（1955）は、2個の円形の乳白色ガラスを背後から照明したものを左右に6° 4′離して暗室中に提示した。左の発光円盤（標準刺激）は直径2インチで被験者から25フィートの距離に置かれた。右の円盤（比較刺激）は25フィートを中心にその前後の種々の距離に置かれ、その直径は視角が一定になるように距離に応じて変えられた。標準刺激の比較刺激に対する輝度比は6.25、2.5、1.0、0.4、0.16であった。被験者は、両眼または単眼で観察し、左右どちらの円盤がより近く見えるかを報告した。その結果、両刺激の提示距離が25フィートの場合に標準刺激がより近いと判断された割合は輝度比にともなって増加することが示され、その傾向は両眼視と単眼視の両条件に共通であった。また、両眼視条件では、極限法を用いて標準刺激の距離の主観的等価値が求められたが、その値は輝度比の対数にともなって増加した。

Fry, Bridgman, & Ellerbrock（1956）は、白色の背景上に黒い長方形（縦43mm、横21.5mm）を提示した。透過光による長方形と背景の像が光学系を通して被験者から5mの位置に形成された。また、光路には直径75mmの穴を開けた黒い板が置かれ、像の位置の前方19cmから後方41cmまでの間を移動可能であった。被験者からは、穴の中央に長方

形、その周囲に背景が見え、穴の外側は暗黒であった。背景の輝度は一定に保たれ、コントラスト（背景と長方形との輝度差を背景輝度で割った値）が100、50、25、15%のいずれかに設定された。被験者は、両眼で観察し、穴の縁が長方形と等距離に見えるように板の位置を調整した。その結果、長方形の見えの距離はコントラストの低下にともなって増大した。

海老原（1973）や海老原（1974）は、暗室内に2個の透過光刺激を提示した。一方は標準刺激で観察者から70cm の距離に提示された。海老原（1973）では0.3、1.0、2.7mL のいずれかの輝度を持つ直径10mm の円盤であり、海老原（1974）では輝度が0.3mL または2.5ml で幅0.5 mm 高さ2mm の線分であった。もう一方は比較刺激で、輝度1.0mL で直径2mm の円盤または輝度0.3mL で幅0.5mm 高さ2mm の線分であった。被験者は、両眼で観察し、両刺激が等距離に見えるように比較刺激の距離を調整した。いずれの実験においても、標準刺激の距離の主観的等価値は輝度が高いほど小さかった。また、両刺激の視方向の隔たりも変化させられた（視角にして10′、25′、50′、1° 40′、2° 30′）が、その隔たりが大きいほど主観的等価値の標準偏差が増加した。また、萩野・西野（1979）も類似の実験を行った。彼らは、幅2mm 高さ50mm の発光線分を用いた。標準刺激の輝度は14.8nt で、提示距離は2m であった。比較刺激の輝度（0.27、0.40、1.25、2.42、14.8nt）と両刺激間の視方向の隔たり（12.0′、25.8′、51.6′、85.9′）が変数であった。主観的等価値は比較刺激の輝度が低いほど小さくなり、海老原（1973, 1974）と同様、明るい対象ほどより近く見えることが示された。また、主観的等価値の標準偏差は刺激間の隔たりにともなって増加した。

元木・大山（1975）は、2個の半円形の透過光面を左右に20° 離して暗

黒中に提示した。左の刺激（標準刺激）は、直径が30′、1°、2° のいずれかで、被験者から114.6cm の距離に提示された。輝度は、波長条件によって異なったが、0.04～59cd/m²の範囲内に3ないし4段階設定された。右の刺激（比較刺激）の直径は1°、輝度は5.0cd/m²であった。標準刺激は4色の単色光（主波長630nm の赤、574nm の黄、518nm の緑、465nm の青）のいずれかからなり、比較刺激は白色であった。被験者は、両眼で観察し、両刺激が等距離に見えるように比較刺激の距離を調整した。同じ波長の場合、標準刺激の距離の主観的等価値は輝度の対数にほぼ比例して減少した。

Schor & Howarth（1986）は、ステレオグラムを用いた両眼立体視の研究において、図形の空間周波数が低い場合には、両眼網膜像差が同じでも図形のコントラストが低いほどより遠くに見えることを見出した。彼らは、CRT ディスプレイ上に描いたステレオグラムをハプロスコープを通して提示した。平均輝度15cd/m²のテスト刺激を基準面（凝視点を含む3個の直径1° 黒点からなる）に対して網膜像差を付けずに提示した場合、空間周波数が6c/deg の条件では凝視点と同一平面上に見えたが、0.15c/deg では凝視点の後方に見え、凝視点と同一平面上に見えるようにするにはテスト刺激に基準面に対する交差網膜像差を与えねばならなかった。しかも、見えの奥行をキャンセルするのに必要な交差網膜像差量はコントラストが低いほど大きかった。また、低空間周波数条件では単眼観察でもテスト刺激が凝視点の後方に知覚されたが、見えの奥行量は両眼視の場合の方が大きかった。

O'Shea, Blackburn, & Ono（1994）は、コンピュータ制御の CRT ディスプレイ上に一辺2° の正方形を2個、左右に2° 離して提示した。実験1では、正方形の輝度の組合せは19cd/m²と96cd/m²および41.2cd/m²と7

4.5cd/m²の二通りで、背景の輝度は58cd/m²を中心に0.10cd/m²から110cd/m²までの11種であった。被験者の課題は、112cmの距離から両眼で観察し、どちらの正方形がより近く見えるかを報告することであった。その結果、背景の輝度が両正方形より明るければ、ほぼ100%暗い方が近いと判断された。背景の輝度が両正方形より暗い場合は逆となった。背景の輝度が両正方形の間にある条件では、背景との輝度の違いの大きい対象の方が近く判断されやすかった。そして、暗い正方形が近いと判断された割合に対応するz得点は、暗い正方形のコントラスト（マイケルソン・コントラスト）を明るい正方形のコントラストで割った値の絶対値の対数にほぼ比例した。実験2では、一方の正方形の一辺が2°を中心に11段階に変化させられた。輝度の組合せは41.2cd/m²と74.5cd/m²のみで、背景の輝度は36.2、57.8、79.5cd/m²の3種類であった。両正方形のコントラストが等しい条件（背景輝度が57.8cd/m²）では一方の正方形がより近いと判断された割合は正方形の大きさにほぼ比例して増加し、両正方形の大きさが等しい条件では、実験1と同様、コントラストの高い正方形がより近いと判断された。しかも、この大きさの効果とコントラストの効果は加算的であった。実験3では、実験1と同じ条件で単眼視と両眼視が比較された。被験者は両正方形間の見えの奥行を正方形消失後に画面に提示される物差し（中央が0で左右に10cmまで目盛りが刻んである）の目盛りで示した。両眼視、単眼視とも、見積もられた奥行量は両正方形のコントラストの比の対数にほぼ比例した。ただし、単眼視の方が見積もられた奥行量は大きかった。

市原・北川(1999)は、コンピュータディスプレイ上で、左右に並んだ二つの円内を明暗50%ずつのランダムドットパタンで満たし、判断対象とした。円の直径は3.2°、両円の中心間の距離は10.1°であった。一方

の円（検査刺激）内の平均輝度は10、20、30cd/m²のいずれか、明暗のドット間のコントラストは10～90%のいずれかであった。他方（比較刺激）は、ドット間のコントラストが50%、平均輝度が10cd/m²であった。背景は一様な灰色で、輝度は10、20、30cd/m²のいずれかであった。被験者は両眼で観察し、検査刺激の見えの距離を7段階（比較刺激と等距離に見えるならゼロ、より近く見えるならプラス、より遠く見えるならマイナス）で評定した。その結果、ドット間コントラストが低い条件では、対象の平均輝度と背景輝度との差が大きいほど見えの距離は小さくなった。しかし、ドット間コントラストが高い条件では、背景輝度に関わりなく、平均輝度の高い対象ほど近く見える傾向がみられた。

1－1－2　色紙を用いた研究

古いところでは、Loewenstein & Donald(1941)の現象観察報告がある。彼らは、一辺5cmの正方形の中央に一辺1cmの白い正方形を乗せた8枚の図形を灰色の背景上に5cm間隔で横一列に並べて提示した。大きい正方形は明るさの異なる8種類の灰色であった。観察距離は3～5mで、照明は昼間の自然光であった。そして、彼らは、白色の小正方形は背景の大正方形が暗いほど突出して、かつ大きく見えると報告した。

Mount, Case, Sanderson, & Brenner (1956)は、晴れた日の屋外に、一辺18インチの正方形の色票を2枚左右に並べて提示した。背景は最も遠い色票の提示位置からさらに約200フィート離れた黄褐色（マンセル色票の9YR 6.0/4に対応）の土手と青空であった。一方の正方形（標準刺激）は、マンセルバリューが8.5または6.5の灰色で、被験者から200フィートの距離に提示された。もう一方の正方形（比較刺激）は、色が赤

（6R 4.0/12）、黄（4Y 8.5/12）、緑（5G 4.5/6）、青（8PB 3.0/12）、および4種の灰色（マンセルバリューが8.5、5.0、4.0、3.0）のいずれかで、被験者から192～220フィートの範囲内の8ヶ所のいずれかに提示された。被験者は、両眼で観察し、どちらの正方形がより近く見えるかを報告した。そして、比較刺激ごとに標準刺激と等距離に見える提示距離が求められた。その結果、有彩色と灰色のいずれにおいても中間の明るさの色（赤と緑あるいはバリュー4.0と5.0の灰色）より両端の明るさの色（黄と青あるいはバリュー8.5と3.0の灰色）の方が見えの距離が小さくなる傾向が示された。また、明度の近い灰色との比較では有彩色の方が見えの距離は小さく、その差は色相に関わりなくほぼ一定であった。彼らは、これらの結果から、背景との明るさのコントラストが大きいほど対象は背景から離れた位置に（言い換えると被験者により近く）知覚されると結論した。また、色相間の差違は、色相そのもの効果ではなく、明度の効果であり、有彩色が明度の等しい灰色より近く見えるのは、背景との彩度の差違が灰色より有彩色の方が大きいことによると主張した。

Ross (1967)は、屋外の空間において距離とコントラストの低下との関係が異なる条件を設定し、周囲とのコントラストが見えの距離に影響することを示した。彼は、10枚の金属製の白色円盤に支柱を付け、地上（草地）または海底（砂地）で左右約20°の範囲内の様々な距離に提示し、被験者に円盤までの距離と円盤の直径を任意の単位で見積もらせた。円盤の提示距離と大きさの組合せは60フィートで6.5インチ、15フィートで8.5インチ、45フィートで6インチ、75フィートで5.5インチ、75フィートで9.5インチ、30フィートで7.5インチ、45フィートで8インチ、60フィートで9インチ、30フィートで10インチ、15フィートで7インチであった。実験は昼間行われ、海底条件では被験者は潜水具を付けて海に潜った。

その結果、全般に地上より海中の方が距離がやや過大評価され、その傾向は距離が大きい場合により明瞭であった。また、同様の実験が地上（大学の芝生）の霧がかかった状態と晴れた状態とで行われた。霧条件で見積もられた距離は、晴れ条件の約2倍であり、距離が増すほどその差が広がる傾向が見られた。そして、水中や霧の中における距離の過大評価は、光の吸収や散乱による、提示距離の増加に伴う円盤と周囲との明るさコントラストの低下が晴れた空中より著しいことによると解釈された。さらに、Ross (1993)は、被験者から一定の距離に一辺2.5cm で様々な明るさの灰色の正方形を提示し、黒っぽく濁った水を入れた水槽越しに単眼で観察する被験者に正方形までの見えの距離を見積もらせた。見積もられた距離は正方形の輝度コントラストの対数に比例した。

高崎・加藤（1974）は、自然光で照明された明室内で、大きな衝立の前に3個の長方形（縦8cm、横3cm）の色票を1cm の間隔で水平に並べて提示した。左右の長方形は同じ色で位置が固定された。刺激面の照度は約100lx であった。被験者は、2～6m の距離から両眼で観察し、他と色の異なる中央の長方形を前後に動かして、3個の長方形が同じ距離に見えるように位置を調整した。背景（衝立）が黒で、長方形がマンセルバリュウー5と9の灰色の場合は、より明るい灰色（マンセルバリュー9）がより近く判断された。

Farnè (1977)は、5種の灰色（マンセルバリュウーが1、3、5、7、9）のいずれかを背景として、白および黒の一辺5cm の正方形を左右に6.41°離して提示した。一方の正方形は被験者から125cm の位置に提示され、もう一方は110～140cm の範囲内の11種の距離のいずれかに提示された。被験者から背景面までの距離は160cm であった。被験者は、単眼で観察し、どちらの正方形がより近く見えるかを報告した。そして、

恒常法の手続によって、背景の明度条件ごとに、125cm に位置を固定された白または黒正方形の距離の主観的等価値が求められた。その結果、黒正方形の場合は背景が明るいほど、白正方形の場合は背景が暗いほど見えの距離が小さくなることが示された。また、背景が比較的暗い（マンセルバリューが5以下）条件では白正方形の方が、背景が明るい（マンセルバリューが9）条件では黒正方形の方が見えの大きさは大きかった。

1－1－3　諸研究のまとめ

上記の諸研究が示す明るさの効果は次のようにまとめられる。

（1）背景がいずれの対象よりも暗い場合には、明るい対象ほど近く見える（透過光または発光刺激に関しては、Ashley, 1898; Coules, 1955; 海老原, 1973, 1974; 萩野・西野, 1979; 元木・大山, 1975; 大山・暈, 1934。色紙刺激に関しては、Ross, 1967; 高崎・加藤, 1974）。

（2）背景がいずれの対象よりも明るい場合には、暗い対象ほど近く見える（Fry et al., 1956）。

（3）背景が中間的な明るさの場合には、背景より明るい対象においては明るいものほど、背景より暗い対象においては暗いものほど近く見える（透過光または発光刺激に関しては、市原・北川, 1999; O'Shea et al., 1994。色紙刺激に関しては、Mount et al., 1956）。

（4）対象の明るさが背景の上下にまたがる場合は、対象の明暗に関わりなく、背景との明るさの差違が大きい対象ほど近く見える(O'Shea et al., 1994; Ross, 1993)。

（5）対象の明るさを一定に保ち、背景の明るさを変化させた場合、対象との明るさの差違の大きい背景ほど対象は近く見える(Farnè, 1977; Loewenstein & Donald, 1941)。

これらの傾向は、背景との明るさの差異の大きい対象ほどより近く見える、とまとめることができる。

（6）見えの距離または対象間の見えの奥行量は対象の輝度あるいは背景とのコントラストの対数に比例する傾向がある（元木・大山, 1975; O'Shea et al., 1994; Ross, 1993）。

（7）両眼視と単眼視とで明るさの効果に明瞭な差はみられない。両条件を比較した研究のうち、Ashley (1898)は差がないと報告し、O'Shea et al., (1994)は単眼視の方がやや強いと報告している。また、Coules (1955)のグラフ（Fig. 4）では単眼視の方が明るさの効果は強そうである。一方、Schor & Howarth (1986)は両眼視の方が効果は大きいと述べている。

1－2　実験1

過去の研究が示した傾向を確認するために一連の実験を行ったが、実験1（江草, 1977a の実験）では、暗室内で2個の透過光刺激を提示し、両者の前後関係の判断を求めた。

方法

被験者　15名の大学生であった。

装置と刺激　厚紙に一辺3cm（視角にして2° 9′）の正方形の穴を5cm（3° 35′）の間隔で二つ左右に並べてあけて、その上にトレース紙を貼り、タキストスコープ（竹井機器製、DP-6）を利用して背後から蛍光灯で照明したものであった。観察距離は80cm で、被験者からは暗黒中に二つの光る正方形のみが見えた。一方の正方形の輝度は常に345

cd/m²で、もう一方の輝度は345、100、20、1、0.2cd/m²のいずれかであった。

手続　被験者の課題は、単眼で3秒間観察し、左右の正方形のどちらが手前に見えるか、あるいは等距離に見えるかを口頭で報告することであった。5種の輝度条件の各々は、左右の配置を逆にして1回ずつ、計2回提示された。

結果

左右の正方形の輝度の異なる4条件の各々について、全被験者から得られた30回の判断の内訳を表２－１に示す。「明るい方が近い」カテゴリーと「暗い方が近い」カテゴリー間の頻度の差についてχ^2検定を行ったところ、正方形間の輝度差が最も小さい100cd/m²の条件では、頻度差が統計的に有意とはならなかった（$\chi^2(1)=0.13$）。しかし、他の条件ではより明るい方がより近く見えるという傾向が明らかであった（20 cd/m²：$\chi^2(1)=22.53$, $p<0.01$；1cd/m²：$\chi^2(1)=26.13$, $p<0.01$；0.2 cd/m²：$\chi^2(1)=26.13$, $p<0.01$）。

第２節　明るさの効果が発生するしくみに関する諸説

対象の明るさの差違がなぜ見えの距離の差違を生むのかという点については、これまでに様々な説明が試みられてきた。そのうちの主要な四つについて検討する。

２－１　過去経験説

序で述べたように絵画的奥行手がかりは学習によって形成されると見

表２－１　各判断の生起数

	暗い方の正方形の輝度（cd/m²）			
判断カテゴリー	100.0	20.0	1.0	0.2
明るい方が近い	16	28	29	29
同じ距離	3	0	0	0
暗い方が近い	11	2	1	1

なされることが多いが、進出後退現象における明るさの効果の起源も大気遠近現象に関する過去経験に求める考え方がある。たとえば、Taylor & Sumner (1945)は、明るい対象ほどより近く見えることを次のように説明する。明るい対象ほど強く網膜像を刺激するので、それだけ明瞭な知覚を生じる。一方、我々は、日常的な経験によって、ある対象が近くに置かれた場合には、同じものが遠くにある場合より鮮明な印象を与えることを知っている。そのため、明るさの違いが生み出した印象の明瞭さの差違が距離の違いによるものと混同されるというわけである。ただ、Taylor & Sumner (1945)の説では明るい対象が常により近く見えることになるが、実際には暗い対象の方が近く見える場合もあることは既に述べた通りであり、彼らの考え方はそのままでは成り立たない。しかし、序で述べたように、大気遠近現象においては遠方の対象ほど周囲とのコントラストが低下する。したがって、その経験から周囲とのコントラスト、すなわち明るさの差違の小さい対象ほど遠く知覚されるようになる、という説明は可能である。ただ、Fry et al. (1956)は、練習を反復しても見えの距離に対するコントラストの効果が変化しなかったことから、この考え方を疑問視している。一方、O'Shea et al. (1994) は、周囲とのコントラストが、個人の経験によって学習される奥行手がかりではなく、人類の進化の過程で獲得された生得的な奥行手がかりである可能性を指摘している。

2－2　瞳孔変化説

Taylor & Sumner (1945)は、対象の明るさにともなう瞳孔の変化が奥行手がかりとなる可能性も挙げている。ただ、そのしくみについては述

べていない。しかし、瞳孔の大きさは、眼球への入射光量だけでなく輻輳や調節と連動しても変化し、近くの物体を注視する時には収縮するという（たとえば、大頭, 1975）。そして、序で述べたように、水晶体の調節の変化は奥行手がかりと見なされるから、このような可能性も考えられないことはない。すなわち、対象の明るさによる瞳孔の収縮・散大が距離の違いによるものと混同されるというわけである。しかし、眼球への入射光量が減れば瞳孔は散大するから、この説にしたがえばより暗い対象は常により遠くに見えることが予測されるが、これは既に述べた事実と矛盾する。また、Mount et al. (1956)は昼間の屋外で明るさの効果を確認しているが、そのような条件下で対象ごとに瞳孔径が変化するとは考えにくい。

2－3　両眼網膜像差説

Fry et al. (1949)は、背景とのコントラストが両眼立体視機構に対して生得的で生理的な働きを持つ可能性を指摘した。しかし、彼らはその具体的なしくみについては何も述べていない。また、高崎・加藤（1974）は対象の明るさの差が両眼網膜像差を生む可能性を指摘した。彼らは、眼球内色収差による網膜像のぼけと輝度レベルによる網膜の分光感度の変化のために、網膜像の有効位置（両眼網膜像差が決定される位置）が輝度に依存して変化するという仮説を提案したが、何ら実証的な証拠を挙げていない。Rohaly & Wilson (1993)は、Schor & Howarth (1986)と類似の実験を行い、コントラストの低い対象は高い対象より遠く見えること、見えの奥行の相殺に必要な網膜像差はコントラストのベキ関数となること、単眼視でも見えの奥行は生じるが、その量は両眼視の場合の

30%程度であることを示した。そして、交差網膜像差に同調している神経細胞と非交差網膜像差に同調している神経細胞とで刺激のコントラストに対する応答特性が異なると仮定して両眼性の効果を説明した。

しかし、この説は、明るさの効果は単眼視でも両眼視でも大差がない、あるいは単眼視の方が大きいという報告と一致しない。

2－4　見えの大きさ説

第４に、対象の明るさの差違が見えの大きさの差違を生み、それがひいては見えの距離の差違を生むという可能性を多くの研究者が指摘している（たとえば、Coules, 1955; Helmholtz, 1862/1963; Taylor & Sumner, 1945）。O'Shea et al. (1994)も、先に述べた実験で見えの距離に対する大きさの効果とコントラストの効果が加算的であったことから、この可能性を示唆した。確かに、明るい対象が暗い対象より大きく見えることや大きい対象ほどより近く見えることは周知の事実であり、この説は有力そうである。

2－4－1　見えの距離に及ぼす大きさの効果

序で述べたように、見えの距離が対象の相対的大きさに依存することについては、多くの心理学教科書に述べられており、実験的証拠も多い。たとえば、萩野（1971）は、黒い衝立を背景にして左に直径2mm の白色円盤、右に2、5、15、30、50mm のいずれかの直径の白色円盤を提示した。両円盤とも前方から照明されており、輝度は約1.5mL であった。右の円盤は被験者から150cm の位置に、左の円盤は150cm を中心とする5ヶ所に提示された。両者の左右方向の隔たりは4、13、26、52mm のいずれかであった。恒常法によって求められた右の円盤の距離の主観的等価値は直径が大きいほど大きくなった。また、両刺激の左右方向の隔たりが大きいほど測定値の標準偏差が増加した。海老原（1973）や元木・大山（1975）も、先に述べた実験において、明るさや色が同じなら大きい対象ほどより近く見えることを示した。

Epstein & Landauer (1969)は、暗黒中に2個の発光円盤を被験者から115cm の距離に左右に並べて提示し、被験者に右の円盤を基準として左の円盤の見えの距離をマグニチュード推定法で報告させた。右の円盤の直径は1.20°、左の円盤の直径は0.25°、0.45°、0.80°、1.20°、2.04°、3.09、4.09°のいずれかであり、両者の左右の隔たりは35°であった。観察は単眼でなされた。その結果、見積もられた距離は対象の視角の対数にほぼ比例して減少した。

Oyama (1974)は、被験者から230cm の距離にあるスクリーン上に白い長方形の像を投影した。長方形の輝度は0.5mL で周囲は暗黒であった。長方形の高さは1° 30′、1° 51′、2° 9′、2° 36′、3° 3′のいずれかであった。また、同じ長方形の像が左右の眼に別々に提示され、左眼の像のスクリーン上の位置を水平方向に変化させることによって、眼の輻輳角が変化させられた。被験者は、両眼で観察し、長方形の見えの高さと距離を cm 単位で見積もった。その結果、輻輳角が一定なら、見積もられた距離は長方形の視角が増すにつれて減少することが示された。

上記の諸報告は対象の視角（あるいは網膜像の大きさ）が異なると見えの距離が異なるというものであったが、Higashiyama (1979)は、対象の視角が一定でも、見えの大きさが異なると違った距離に見えることを報告した。彼は、暗黒中に透過光による2個の正方形を1秒間隔で継時的

に提示した。一方（比較刺激）は、一辺の視角が1° 44′ で、被験者から33、54.5、133cm のいずれかの距離に提示された。他方（標準刺激）は被験者から151.5cm の距離に提示され、一辺は2° 5′ 、1° 53′ 、1° 44′ 、1° 31′ のいずれかであった。被験者は、単眼で観察し、1番目の正方形を基準として、2番目の正方形の見えの大きさと距離をマグニチュード推定法によって報告した。その結果、比較刺激の提示距離が長くなるほど、比較刺激の見えの大きさは増加し、見えの距離は減少した。すなわち、対象の見えの大きさが大きいほど近く見えることが示された。

2－4－2　見えの大きさに及ぼす明るさの効果

対象の明るさが見えの大きさに影響を及ぼすことも、いわゆる光浸（光滲）現象（irradiation）として古くから知られてきた。たとえば、Göthe (1810)は、黒地上の白い円と白地上の黒い円を比べると、実際には同じ大きさであっても白い円の方が大きく見えることを述べている。

実験的研究としては、まず、Holway & Boring (1940)のものが挙げられる。彼らは、暗黒中に2個の円形の発光刺激を90° 離して被験者から等距離に提示した。一方の刺激（標準刺激）は直径が一定で、輝度が3段階（他方の刺激の1.00、0.10、0.01倍）に設定された。もう一方の刺激（比較刺激）は輝度が一定であり、その直径を連続的に変化させることにより、標準刺激の大きさの主観的等価値が測定された。観察は92cm の距離から両眼でなされた。その結果、暗い刺激ほど見えの大きさは小さくなった。標準刺激の直径が視角1° の条件では、輝度が10倍になると見えの大きさは平均して1.12倍に増加し、100倍になると平均1.38倍に増加した。標準刺激の直径が視角0.5° の条件では、各々1.15倍、1.60倍であった。

Robinson (1954)も、暗黒中に発光刺激を提示する実験を行い、見えの大きさへの明るさの影響をより詳細に検討した。標準刺激の直径は2インチに固定され、比較刺激の直径は1.6インチから2.4インチまで0.025インチの間隔で変化させることができた。両刺激の輝度比は6.25、2.50、1.00、0.40、0.16の5種類であった。被験者の課題は、25フィートの距離から両眼および単眼で刺激を観察し、左右どちらの刺激がより小さく見えるかを報告することであった。その結果、比較刺激の方が小さいという判断の出現率は相対輝度の増加につれて単調に増加し、この傾向は単眼視と両眼視に共通であった。また、両眼視条件について50％の基準で求められた標準刺激の大きさの主観的等価値は、輝度比の対数にほぼ比例して増加した。

Oshima, Kuroe, Endo, Hase, & Yamanaka (1952)は色紙を用いて実験を行った。彼らは、直径3cm の円形の窓を開けた二つの衝立を並べ、各々の窓の背後に明るさの異なる灰色色紙を提示した。その際、一方の窓の明度は固定され、他方の窓の明るさが11段階に変化させられた。二つの衝立の明るさは等しく、窓に用いられたどの灰色よりも暗かった。また、一方の窓の大きさは固定され、もう一方の窓の大きさは、衝立を被験者に近づけたり遠ざけたりすることによって変化させられた。被験者の課題は50cm の距離から単眼で観察し、2個の窓が等しい大きさに見えるように衝立の位置を調整することであった。その結果、見えの大きさは窓の明るさにほぼ比例して増加した。

最近では、de Weert, Snoeren, & Puts (1998)が、コンピュータで制御されたディスプレー上に2個の円盤刺激を提示する実験を行い、輝度が高いほど見えの大きさが増すことを報告している。

上記の諸研究では背景の明るさが一定であったが、玉池（1935）は対象の明るさとともに背景の明るさも変化させた。彼は、二重同心円形の標準刺激と白色円盤の比較刺激とを黒い紙を貼った衝立上に左右に22cm離して提示し、標準刺激の内部円盤と外部環の色を黒、白および3種の灰色のいずれかとした。内部円の直径は9cm、外部円の直径は18cmであった。観察は2mの距離から両眼でなされ、恒常法によって標準刺激の内部円盤の大きさの主観的等価値が求められた。その結果、標準刺激の内外の明るさに差があると、差がない場合より見えの大きさが小さくなる傾向が見られた。特に、内部が外部より暗い場合には、明るさの差が大きいほど見えの大きさは小さかった。

しかし、背景との明るさコントラストが高い刺激ほど大きく見えるという、逆の報告もある。たとえば、Erning, Gerrits, & Eijkman（1988）は、CRTディスプレイ上の左半分に標準刺激である一辺109′の正方形と背景を提示し、右半分に比較刺激である幅3′の輪郭線からなる正方形と背景が提示された。標準刺激と背景との平均輝度は35cd/m²で、標準刺激が背景より暗い条件と明るい条件とが設けられた。両条件ともコントラスト比（マイケルソンコントラスト）は2、5、8、10、15、25、50、82％の8種であった。比較刺激の背景の輝度は35cd/m²であった。被験者が150cmの距離から単眼で観察して、標準刺激と同じ大きさに見えるように比較刺激の大きさを調整することにより、標準刺激の大きさの主観的等価値が求められた。その結果、標準刺激が背景より暗いか明るいかに関わりなく、見えの大きさはコントラストにともなって増加する傾向が示された。また、同じコントラストなら明るい標準刺激の方が暗い標準刺激より見えの大きさは大きく、その傾向はコントラストが高いほど顕著であった。これらの傾向は、背景の輝度を一定にした、したがってコントラストを変えると平均輝度も変わる場合や、比較刺激を輪郭線ではなく塗りつぶしの正方形にした場合でも同じであった。

一方、背景とのコントラストは見えの大きさに影響せず、背景の明るさに関わりなく明るい対象ほど大きく見えるという報告もある。Oyama & Nanri（1960）は、一辺20cmの色紙の正方形上に直径6cmの色紙の円盤を重ねた図形を標準刺激とし、一辺20cmの白地の正方形上に黒い線で円を描いたものを比較刺激として、極限法を用いて標準刺激の円盤の大きさの主観的等価値を測定した。両刺激は縦80cm、横90cmの灰色（マンセルバリューが7.5）の衝立上に、比較刺激が標準刺激の下10cmで右10cmに位置するように配置された。観察は115cmの距離から両眼でなされた。標準刺激の正方形を白、灰、黒（マンセルバリューは9.4、5.4、1.7）のいずれかとし、円盤を6種の灰色（マンセルバリューは1.7、3.5、4.4、6.3、8.2、9.4）とした場合、円盤の見えの大きさは、いずれの背景においても円盤の明度が高いほど大きく（順位相関係数は0.93～1.00）、かつ背景の明度が低いほど大きかった。統計的分析によると交互作用は有意ではなく、両明度の効果が加算的であることが示された。

2－4－3　見えの大きさ説の問題点

見えの距離への大きさの効果については、諸研究の結果が一致して、大きい対象ほどより近く見えることを示している。また、見えの大きさへの明るさの効果についても、背景が全ての対象より暗い場合には明るい対象ほど大きく見えるという点で、玉池（1935）を除く諸研究は一致している。したがって、背景が全ての対象より暗い場合には明るい対象

ほどより大きく見え、そのためにより近く見えることが予測され、この条件に限れば見えの大きさ説は有効である。

問題は、過去の報告が互いに一致しない、背景が全ての対象より明るいか、あるいは中間的な明るさを持つ場合である。もし、Erning et al. (1988)が言うように、背景とのコントラストが高い対象ほど見えの大きさが増すのであれば、見えの大きさ説は、背景との明るさの差異の大きい対象ほどより近く見えるという既知の実験的事実をうまく説明できる。しかし、玉池（1935）や Oyama & Nanri（1960）の報告が正しければ、見えの大きさ説からの予測は実験的事実と一致しない。玉池（1935）の結果に基づけば背景とのコントラストが高い対象ほど遠くに見えることが予測され、Oyama & Nanri（1960）の結果からは背景の明るさに関わりなく常に明るい対象ほど近く見えることが予測されるからである。

このように、見えの大きさ説は有望であるにもかかわらず、その検証の決め手となるべき、見えの大きさに対する明るさの効果についての過去の報告が必ずしも一致していない。そこで、見えの大きさ説を検証するための実験を行うことにした。

第３節　見えの大きさ説の実験的検討

諸説明の中でも有力と思われる、見えの大きさ説の実験的な検討を行った。まず、実験２（江草，1977a において発表）、実験３（江草，1984において発表）において、見えの大きさへの明るさの影響に関する過去の報告を再確認した。そして、実験４（江草，1977a において発表）において、見えの大きさ説の直接的な検証を試みた。

３－１　実験２

方法

実験１の後、同じ装置と刺激を用い、同じ被験者に左右の正方形のどちらがより大きく見えるかを判断させた。大きさ判断である点を除いて手続は距離判断の場合と同じであった。

結果

各刺激がより大きいと判断された頻度を表２－２に示す。「明るい方が大きい」カテゴリーと「暗い方が大きい」カテゴリー間の頻度差に関してχ^2検定を行ったところ、正方形間の輝度差が最も小さい100cd/m^{2}の条件では、差が統計的に有意とはならなかった（$\chi^2(1)=1.64$）。しかし、他の条件では有意であった（20cd/m^2：$\chi^2(1)=4.17$，$p<0.05$；1cd/m^2：$\chi^2(1)=19.59$，$p<0.01$；0.2cd/m^2：$\chi^2(1)=19.59$，$p<0.01$）。すなわち、より明るい方がより大きく見えるという傾向が確認された。

３－２　実験３

方法

被験者　矯正視力を含めて正常な視力を有する15名の大学生であった。

装置と刺激　装置の概略は図２－１のようなものであった。観察距離95cm の位置に衝立（図中の SC）が置かれ、被験者の正面、眼の高さに二つの長方形の穴が水平に並べて開けられた。穴の大きさは視角にして縦2.40°、横1.82°で、二つの穴の間隔は4.80°であった。それぞれの穴の52.5cm 後ろに対象領域を構成する色彩面（図中の TC）が立てられた。衝立と対象色彩面は2本の蛍光灯（図中の FL）で別々に照明さ

表２－２　各判断の生起数

	暗い方の正方形の輝度（cd/m²）			
判断カテゴリー	100.0	20.0	1.0	0.2
明るい方が大きい	8	17	25	26
同じ大きさ	8	6	3	3
暗い方が大きい	14	7	2	1

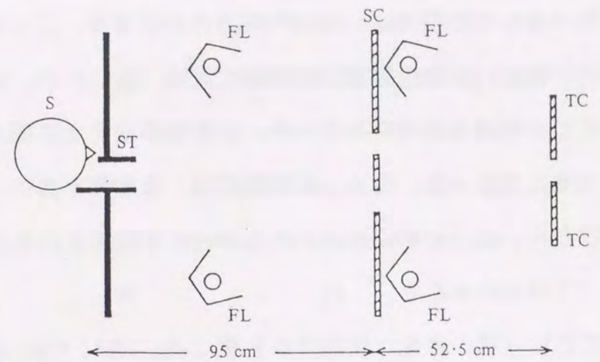


図２－１　装置の略図。Sは被験者、STは視野制限用の筒、SCは衝立、TCは判断対象の色彩面、FLは蛍光灯を表す。

れた。被験者は先端に正方形の窓を持つ筒（図中のST）を通して右眼で観察した。筒を通しての視野は、約20°四方の大きさで、二つの比較的小さな長方形の領域（対象色彩面）と周囲の領域（衝立）の、いずれも色が均一な三つの領域で構成されていた。対象色彩面および衝立の縁は被験者からは見えなかった。なお、対象領域は、ほとんど常に、衝立の穴としてではなく、衝立の前に置かれたものとして知覚されることが、予備観察によって確かめられた。

対象色彩面の色は４種の灰色（暗い方から順にG1、G2、G3、G4と呼ぶ）で、その輝度は12、57、118、207cd/m^{2}であった。そして、G1とG4、G2とG3の2種の組合せが提示された。衝立の色は黒（3cd/m^2）または白（250cd/m^2）であった。

手続　被験者は、左右の長方形のどちらがより大きく見えるかを判断し、口頭で報告した。対象色彩面の2種の対（G1-G4とG2-G3）と2種の衝立（白と黒）との組合せによる4条件は、対をなす対象色彩面の左右の配置を逆にして1回ずつ計2回、ランダムな順序で提示された。

結果

各対象がより大きいと判断された頻度の全被験者にわたる合計を表２－３に示す。周囲が対象より暗いか明るいかに関わりなく、より明るい対象がより大きく判断される傾向が確認された。χ^2検定の結果、4条件全てにおいて頻度差が有意となった（黒背景・G1-G4：$\chi^2(1)=30.00$, $p<0.01$；黒背景・G2-G3：$\chi^2(1)=19.20$, $p<0.01$；白背景・G1-G4：$\chi^2(1)=8.53$, $p<0.01$；白背景・G2-G3：$\chi^2(1)=4.80$, $p<0.05$）。

３－３　実験４

表２－３　より大きいと判断された回数

	対象領域の明るさの組合せ			
背景	G1－G4		G2－G3	
黒	0	30	3	27
白	7	23	9	21

方法

被験者　実験１、２と同じ15名であった。

装置と刺激　実験１、２と同じ装置を用い、物理的な大きさが異なる二つの正方形を提示した。一方の正方形は常に一辺3cm、輝度345cd/m^{2}で、他方は一辺が3.3、3.5、4.0cm（視角にすると2° 22′、2° 30′、2° 52′）のいずれかで、輝度は345、100、20、1、0.2cd/m^{2}のいずれかであった。

手続　実験１と同じ距離判断課題および実験２と同じ大きさ判断課題を被験者に課した。ただし、被験者全員に対して距離判断課題を先に実施した。

結果

大きさ判断の結果を表２－４に、距離判断の結果を表２－５に示す。大きさ判断に関しては、ほぼ一貫して、物理的に大きい正方形の方がより大きく判断された。「暗い（大きい）方が大きい」カテゴリーと明るい（小さい）方が大きい」カテゴリーとの頻度の差違が最も少ない条件（3.3cm、0.2cd/m^2）においてさえ、その差は統計的に有意であった（$\chi^2(1)=7.54$, $p<0.01$）。

一方、距離判断では、より大きい（物理的にも知覚上でも）正方形がより近く判断されるとは限らなかった。確かに、輝度が同じ場合は、物理的により大きい正方形が、一貫してより大きく、かつ、より近く判断された。しかし、大きい方の正方形の輝度が下がるにつれて、より小さく、かつ、より輝度の高い正方形の方が、依然としてより小さく判断されているにもかかわらず、より近く判断されやすくなった。その傾向は、大きい方が直径3.3cmで輝度が1.0または0.2cd/m^{2}の条件、および3.5cmで0.2cd/m^{2}の条件において、統計的にも有意であった（$\chi^2(1)=6.53$,

表２－４　大きさ判断における各判断カテゴリーの生起数

大きい方の正方形の一辺（cm）	判断カテゴリー	大きい方の正方形の輝度（cd/m^2） 345.0	100.0	20.0	1.0	0.2
3.3	明るい（小さい）方が大きい	0	0	0	0	6
	同じ距離	0	0	0	5	4
	暗い（大きい）方が大きい	30	30	30	25	20
3.5	明るい（小さい）方が大きい	0	0	0	0	1
	同じ大きさ	0	0	0	0	1
	暗い（大きい）方が大きい	30	30	30	30	28
4.0	明るい（小さい）方が大きい	0	0	0	0	0
	同じ距離	0	0	0	0	0
	暗い（大きい）方が大きい	30	30	30	30	30

表２－５　距離判断における各判断カテゴリーの生起数

大きい方の正方形の一辺（cm）	判断カテゴリー	大きい方の正方形の輝度（cd/m²） 345.0	100.0	20.0	1.0	0.2
3.3	明るい（小さい）方が近い	0	6	9	22	26
	同じ距離	0	0	2	0	1
	暗い（大きい）方が近い	30	24	19	8	3
3.5	明るい（小さい）方が近い	0	2	8	18	22
	同じ距離	0	0	1	1	1
	暗い（大きい）方が近い	30	28	21	11	7
4.0	明るい（小さい）方が近い	0	1	2	12	18
	同じ距離	0	0	0	0	0
	暗い（大きい）方が近い	30	29	28	18	12

$p<0.05$; $\chi^2(1)=9.12$, $p<0.01$; $\chi^2(1)=7.76$, $p<0.01$）。

３－４　実験２、３、４の結果についての考察

実験２、３より、背景が対象より明るいか暗いかに関わりなく、明るい対象ほどより大きく見える傾向が明らかとなった。既に述べたように、見えの大きさ説に従うと、この結果からは背景の明るさに関わりなく、明るい対象ほどより近く見えることが予測され、事実と一致しない。また、実験４では、見えの大きさ関係は変化していないのに、明るさの差違が増すと、より明るい方の対象がより近く判断される傾向の強まることが示された。この結果は、より明るい対象は、より大きく見えるから、より近く感じられるという、見えの大きさ説とは矛盾する。以上のことから、明るさの差違に伴う見えの大きさの差違に原因を求める説は不十分なものと結論せざるをえない。

第４節　図－地知覚説

これまでに提案された仮説は、いずれも既知の事実を十分には説明できないことが明らかとなった。そこで、上記の諸説に替えて、図と地の分化という知覚の基本的な性質が、この現象の本質をなすという仮説（図－地知覚説と呼ぶことにする）を提案したい。

４－１　Oyama & Yamamura (1960) の報告

この仮説を思いつくきっかけとなったのは Oyama & Yamamura (196

0)の報告であった。彼らは、図２－２のような装置を用い、被験者（図中のSUBJECT）の前方50cmの位置に立てられた黒い衝立の小開口（一辺5cmの正方形）を通しての視野の右半分に提示される対象面（図中のCOLORED CARD）までの距離を被験者に判断させた。対象面には種々の明るさの灰色色紙が用いられた。視野の左半分は、対象面の100cm後方に提示される、白または黒の背景面（図中のBACK SCREEN）によって占められた。また、対象面の提示方向から90°離れた方向にもう一つの黒い衝立が立てられ、その小開口を通しての視野の中央には、白色の面を背景として幅2mmの黒い棒（図中のCOMPARISON POLE）が見えていた。そして、実験者がその棒を前後に動かし、被験者は対象面と等距離に見える棒の位置を報告した。その結果は、対象面の明るさも背景面の明るさも見えの距離に差を生まないというものであった。

先に述べたように、距離知覚への明るさの効果は多くの研究が一致して認めるところであり、それを否定するものとしては、この研究がほとんど唯一のものであった。ただ、Oyama & Yamamuraの用いた刺激布置は他に例を見ないものであった。そこで、実験５（江草，1977bにおいて実験Ｉとして発表）では、彼らと同様な装置を用いて彼らの報告の再確認を試みた。

４－２　実験５

方法

被験者　8名の大学生であった。

装置と刺激　図２－３の模式図に示される装置や刺激が用いられた。

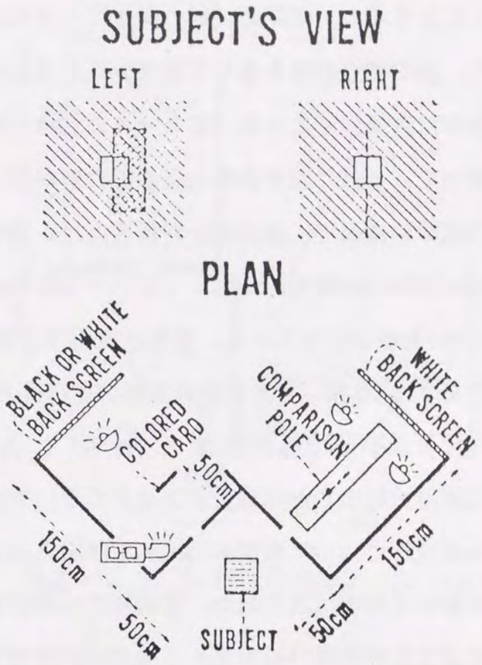


図２－２　Oyama & Yamamura (1960)の実験装置

被験者（図２－３中の Observer）の左右斜め60cm 前方に黒い衝立が互いに直交するように立てられ、被験者の眼の高さに一辺5cm の正方形の窓が開けられた。左の衝立の窓を通して右半分に見えるのが標準刺激となる面で、左半分は背景面であった（図２－４の Left を参照。左下がりの斜線部が衝立で、それに囲まれた中央の正方形が窓。また、右下がりの斜線部分が標準刺激面で、空白部分が背景面）。標準刺激面（図２－３の Ss）は衝立の40cm 後方、背景面（図２－３の Background）はさらに80cm 後方に垂直に立てられた。標準刺激面は灰色の標準色紙からなり、その明るさは3種類（日本色彩研究所の色研番号では0-12-0、0-15-0、0-18-0。マンセル表示では N2. 8/0. 0、N4. 7/0. 0、N7. 1/0. 0）であった。背景面は画用紙に白または黒のポスターカラーを塗ったものであった。両面とも蛍光灯によって照度約1360lx で照明された。ただし、黒背景の場合は背景用の照明は消された。右の衝立の窓の中央には比較刺激となる垂直に立てられた黒い棒が見え、残りの部分は背景面であった（図２－４の Right を参照。中央の右下がりの斜線部分が比較刺激、空白部分が背景面）。背景面は衝立の後方120cm に立てられた。比較刺激の棒（図２－３の Sc）は被験者が糸を操作することによって前後に動かすことができた。背景面は白で、白熱電球によって照度約190lx で照明された。なお、実験は暗室で行われ、上記のもの以外の照明は全て消された。

手続　被験者の課題は、両眼で観察し、左の窓の中央部に見える標準刺激面の左端と比較刺激棒とが自分から等距離にあると感じられるように、比較刺激棒の位置を調整することであった。ただし、標準刺激面と比較刺激棒を同時に見ることはできないので、被験者は必要に応じて顎台の上で顔の向きを変え、継時的な比較を行った。そして、衝立から調

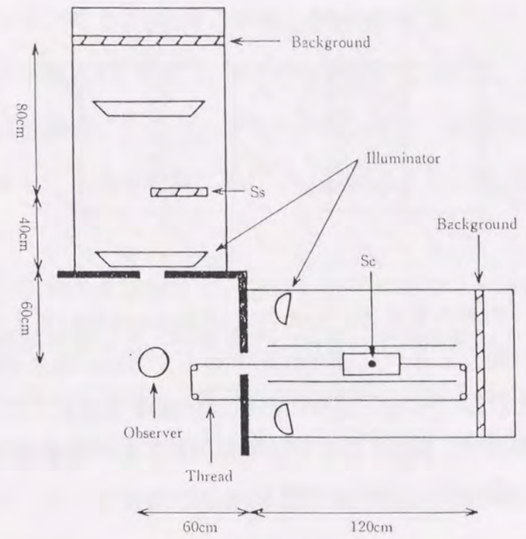


図２－３　装置の略図。Ss は標準刺激面、Sc は比較刺激棒を示す。

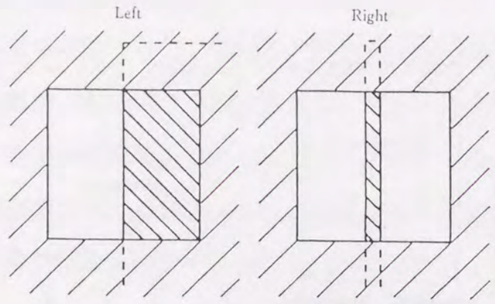


図２－４　刺激の見え方。Left および Right の図の左下がりの斜線部が衝立、それに囲まれた中央の正方形が窓を表す。また、Left の図では右下がりの斜線部が標準刺激面、空白部が背景面を表す。Right の図では中央の右下がりの斜線部が比較刺激、空白部が背景面を表す。

整された棒の位置までの距離（以下、判断された距離と呼ぶ）が計測された。標準刺激の明るさ3条件と背景の2条件の組合せによる6条件の各々に対して上昇下降各4系列ずつ、計8回の測定がなされた。標準刺激条件の実施順序は被験者ごとにランダムとした。また、被験者の半数に対しては白背景を先に、残り半数に対しては黒背景を先に提示した。

結果と考察

判断された距離の全被験者を込みにした平均を図２－５に示す。白背景では暗い標準刺激ほど、黒背景では明るい標準刺激ほど判断された距離は小さかった。すなわち、標準刺激と背景との明るさの差違が大きいほど判断された距離が大きくなる傾向が示された。背景の明るさ、標準刺激の明るさ、および被験者を要因とする三要因分散分析の結果、被験者の主効果、背景の明るさと標準刺激の明るさとの交互作用、標準刺激の明るさと被験者の交互作用、および三要因交互作用が有意となった（被験者：$F(7, 336)=83.05$, $p<0.01$；背景の明るさ×標準刺激の明るさ：$F(2, 336)=141.60$, $p<0.01$；標準刺激の明るさ×被験者：$F(14, 336)=3.68$, $p<0.01$；背景の明るさ×標準刺激の明るさ×被験者：$F(14, 336)=16.96$, $p<0.01$）。この結果は Oyama & Yamamura (1960) の報告とは明らかに異なる。

被験者要因と他の要因との交互作用が有意となったので、全被験者の平均ではなく、被験者ごとに結果を整理してみた。その結果、判断された距離に対する明るさの効果の現れ方に個人差があり、図２－６に示される四つのタイプに分類できることが明らかになった。図中のタイプＡは、全被験者の平均と同じ傾向を示すもので、背景との明るさの差違の大きい標準刺激ほどより近く判断された。このタイプは8名中5名であった。タイプＢでは、背景に関わりなく、明るい標準刺激ほどより近く

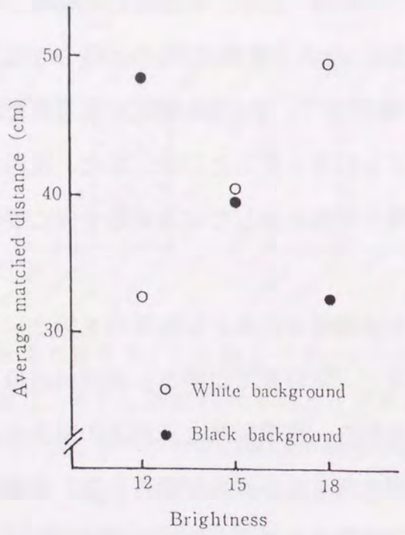


図２－５　判断された距離（全被験者の平均）と標準刺激面の明るさとの関係。横軸は標準刺激の色研明度番号である。

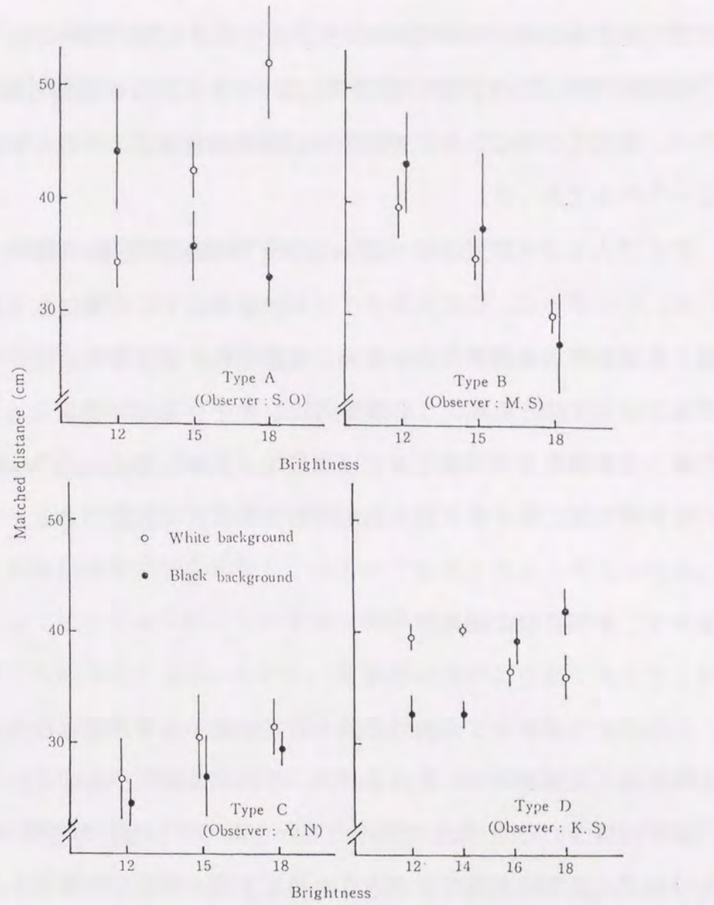


図２－６　判断された距離（被験者別の平均）と標準刺激面の明るさとの関係。明るさの効果の現れ方に関する四つのタイプの代表例を示してある。横軸は標準刺激の色研明度番号であり、図中の縦線分は標準偏差を表す。

判断された。タイプCでは、背景に関わりなく、暗い標準刺激ほどより近く判断された。タイプBは1名、タイプCは2名であった。また、予備実験では、これら3タイプ以外に第4のタイプDが確認された。それは、背景との明るさの差違の小さい標準刺激ほどより近く判断されるというものであった。

タイプAとタイプD、タイプBとタイプCは正反対の傾向を表している。したがって、これらのタイプが被験者の中に均等に含まれていれば、全被験者の平均値においては、相殺されて明るさの効果が消えてしまうことが予測される。この実験では、タイプAが半数以上を占めたため、全被験者の平均値もタイプAとなったが、Oyama & Yamamuraの被験者では、各タイプの人数が均等であった可能性がある。

4－3　被験者の内観報告

上記のような明るさの効果の個人差を解釈する手がかりは、被験者の実験後の内観報告の中に見出された。それによると、物理的には背景面が標準刺激面の80cm後方にあるにもかかわらず、被験者全員がそれに気づかず、標準刺激面のすぐ近くにあると思っていたのである。被験者によっては、背景面の方が標準刺激面より前に見えていたと報告した。また、観察中に標準刺激面の見えの距離が変化し、近づいたり遠ざかったりするように見えるという報告もあった。

この実験やOyama & Yamamuraの刺激布置では、背景面は衝立と標準刺激面に囲まれて、いわゆる開口色の状態にあり、背景面と標準刺激面との間の距離を知覚する手がかりがほとんどない。したがって、両者がほとんど同じ位置に見えても不思議はない。事実、著者は、別の被験

者に左側の面（すなわち背景面）の右端と同じ距離に比較刺激棒の位置を調整させる実験も行ったが、全条件と4名の被験者を込みにした場合の判断された距離の平均は約47cmで、対象面に対する上記の8名の判断された距離の平均（約41cm）とほぼ同程度であった。

4－4　実験5の結果を説明するための図－地知覚説

実験5の刺激布置の場合、網膜像における標準刺激面と背景面との境界（図2－4 Leftの右下がり斜線部と空白部との垂直の境目）の三次元的位置、すなわち衝立からその境界までの距離は、境界と衝立の窓（図2－4 Leftの左下がり斜線部で囲まれた正方形）の左右の縁とが作り出す両眼網膜像差の手がかりに基づいて知覚されると考えられる。ただし、上に述べたように、その距離は標準刺激面と背景面のどちらまでの距離とも知覚されうる。しかし、背景面の方がより近く見えるとか、見えの距離が変動するとかいった報告はこれだけでは理解しがたい。

そこで、これらの奇妙な見え方の解釈として、標準刺激面と背景面とが図と地の関係を形成しており、その関係は反転しうる、と仮定する。すなわち、刺激の物理的布置は図2－7ａのようであるにもかかわらず、ｂ（標準刺激面が図として、背景面が地として知覚される場合）、またはｃ（標準刺激面が地として、背景面が図として知覚される場合）のような二通りの知覚が生じうるというわけである。この仮定にしたがうと、一般に図となった領域は地となった領域の前方に定位されるから、たまたま背景面が図、標準刺激面が地として知覚されたならば、図2－7ｃのように背景面が標準刺激面より前に見えることが予測される。すなわち、先に紹介した被験者の報告が説明可能になるのである。また、標準

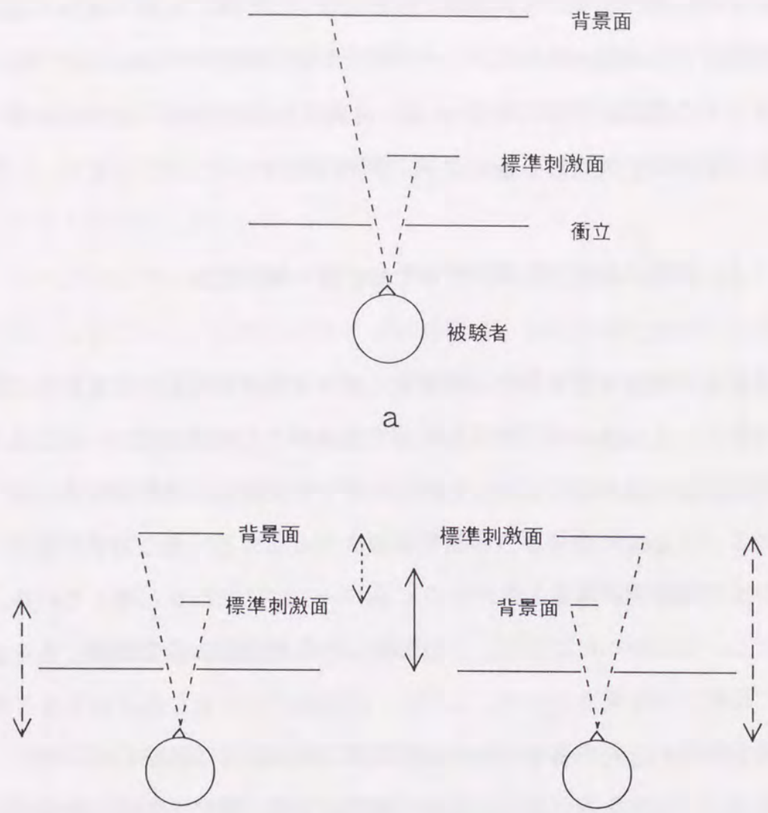


図２－７　物理的な刺激布置（ａ）と図－地知覚説が予測する見え（ｂ、ｃ）。ｂ図は標準刺激面が図として知覚される場合、ｃ図は背景面が図として知覚される場合を示す。ｂとｃの間の実線矢印は両眼網膜像差によって知覚される奥行、点線矢印は図と地の分化による奥行を表す。また、ｂの左およびｃの右の破線矢印は被験者が判断する距離を表す。

刺激面までの見えの距離（図２－７ｂおよびｃの破線矢印が示す距離）は、標準刺激領域と背景領域の境界と衝立の窓の縁との両眼網膜像差に基づく知覚的奥行（図２－７ｂとｃの間の実線矢印が示す隔たり）と両領域の図－地分化に基づく知覚的奥行（図２－７ｂとｃの間の点線矢印が示す隔たり）とが合成されたものによって決まると仮定する。

通常、図と地の語は、同一平面上の隣接領域間の知覚的関係に適用される。上記の実験事態では標準刺激面と背景面は同一平面上にないので、この概念を適用するのは不適切と思われるかもしれない。しかし、上記の刺激布置から生じる標準刺激面と背景面の単眼網膜像は、両者が同一平面上にある場合と同じである。したがって、両者の間に、両者が同一平面上にある場合と同様な図－地知覚が成立すると考えても差し支えはないはずである。予備実験においては図２－８の右下がりの斜線部分ような支柱付きの正方形が標準刺激として衝立の窓の中央に提示された。この刺激を「はえたたき」と見ずに「鍵穴」と表現した被験者がいたが、この報告はまさに背景面が図として知覚されたことを示している。また、標準刺激面の見えの距離の変動も、標準刺激面と背景面と図－地関係の反転として説明可能である。すなわち、標準刺激面が図（図２－７ｂの状態）から地（図２－７ｃの状態）へと変わる際に遠ざかるように見え、逆の場合に近くづくように見えると考えられる。

さらに、標準刺激面と背景面との間に図－地分化に基づいて生じる知覚的奥行量についての仮定を置く。一般に、網膜像の隣接領域が知覚上で異なる性質を帯びる、いわゆる図と地の分化は、領域間の明るさの差違が大きいほど明瞭になる（大山，1969）。たとえば、Cohen(1957，1958)は、二つの中空の球を組み合わせた装置を用いて二つの異質な領域（それぞれの内部は等質）からなる視野を作った場合、領域間の強度差

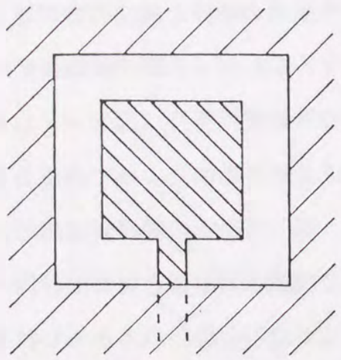


図２－８　刺激の見え方。図２－４と同様、左下がりの斜線部分が衝立、それに囲まれた正方形が窓である。右下がりの斜線部は標準刺激面、空白部分は背景面である。

が増すほど図－地分化が進むことを報告している。図－地分化が明瞭になるということは、とりもなおさず、図－地分化の特性の一つである、両者間の知覚上での三次元的分離が明瞭になることと考えられる。そこで、Oyama & Yamamura (1960)や実験５の刺激布置において、図－地関係にある標準刺激面と背景面との間の三次元的分離、すなわち知覚的奥行（図２－７ｂ、ｃの点線矢印で示された隔たり）は、どちらが図になるかに関わりなく、両者の明るさの差が増すほど大きくなると仮定する。

これらの仮定にしたがうと図２－６に示された明るさの効果の個人差は次のように説明できる。標準刺激面が図になる場合は、背景面との明るさの差が大きい標準刺激面ほど、地である背景面との間の知覚的奥行が増し（図２－７ｂの点線矢印で示された隔たりが前後双方向に広がり）、被験者により近く見える（図２－７ｂの破線矢印で示された距離が短縮される）ことが予測される。これは既に述べたタイプＡに相当する見え方である。標準刺激面が地になる場合は、ちょうどこの逆になる（図２－７ｃの破線矢印で示された距離が伸張される）ので、タイプＤに相当する見えが生じることになる。標準刺激面と背景面のうちのより明るい方が図になるならば、黒背景では、標準刺激面が図になり、背景面との明るさの差がより大きい、すなわちより明るい標準刺激ほど被験者により近く見えることになる。一方、白背景では、標準刺激面は地となり、背景面との明るさの差がより大きい、すなわちより暗い標準刺激ほどより遠くに見える。したがって、背景に関わりなくより明るい標準刺激ほどより近く見えるという、タイプＢが予測されることになる。標準刺激面と背景面のうちのより暗い方が図になる場合は、逆のタイプＣの見えが予測される。

ただし、図２－５に示されたような、8回の判断の平均値における明るさの効果の個人差を説明するためには、標準刺激面と背景面との図－地関係について、個人差と個人内での安定性とを仮定する必要がある。なぜなら、同一個人において図－地関係が絶えず反転するならば、複数回の測定の平均値においては、明るさの効果が相殺されて消えてしまう可能性があるからである。

４－５　実験６

実験６（江草，1977b において実験Ⅱとして報告）では、実験５の結果を説明するための諸仮定、（１）標準刺激面と背景面が図－地関係をなし、その関係は反転しうる、（２）どちらが図になるかに関わりなく、両面の明るさの差が大きいほど図および地としての両面間の知覚的奥行が増す、（３）両面の図－地関係には個人差がある、（４）両面の図－地関係は個人内では比較的安定している、を確認した。そのために実験５の装置で標準刺激面と背景面との間の、見えの前後関係と奥行量が測定された。

方法

被験者　実験５の参加者を含む10名の大学生であった。

装置および刺激　実験５と同じもの（図２－３、２－４を参照）を用いた。

手続　各試行の初めに比較刺激棒を衝立の後方40cm の位置に置き、それが左の窓の左半分を占める面（背景面）と等距離にあると被験者に教示した。そして、左の窓の左右の面を比べて、右の面（標準刺激面）が左の面（背景面）より前に見えたら、その奥行（図２－７ｂ、ｃの点線矢印で示される隔たり）に相当すると思われるだけ棒を手前に動かし、逆に左の面より後に見えたら棒を遠ざけるよう求めた。判断回数は実験５と同じ6条件の各々に対して８回であった。右の面（標準刺激面）の提示順序は被験者ごとにランダムにし、左の面（背景面）については、被験者の半数に対して白条件を先に、残り半数に対して黒条件を先に実施した。

結果

各被験者における各判断カテゴリーの出現頻度を表２－６に示す。表中の＋判断は比較刺激棒を近づけた場合、－判断は遠ざけた場合、0判断は動かさなかった場合を示す。表より＋および－判断に関して5種類の個人タイプが確認された。まず、どの条件でも＋判断、すなわち標準刺激面が背景面の手前に見える場合が大多数を占める被験者が2名（S. H は42回中41回、T. M は45回中45回。総数は0判断を除いた数）。第２に、白背景では－判断、黒背景では＋判断、すなわちより明るい方が手前に見える場合のみの被験者が3名（M. S は48/48、O. T は48/48、Y. S は48/48）。逆に、白背景では＋判断、黒背景では－判断、すなわちより暗い方が手前に見える場合のみの被験者が2名（T. H は48/48、Y. I は30/30）。第４に、全条件で－判断、すなわち標準刺激面が背景面の後に見える場合のみの被験者が1名（K. S で48/48）であった。他の2名はどの条件でも＋と－の両判断を示し（I. K では＋判断が23回、－判断が22回、第２タイプの判断が27、第３タイプの判断が18。Y. O では＋判断が19回、－判断が27回、第２タイプの判断が28、第３タイプの判断が18）、χ^2検定を行ったところ、＋判断と－判断の頻度差および第２タイプと第３タイプの頻度差ともに統計的には有意ではなかった。

比較刺激棒の移動距離、すなわち標準刺激面と背景面の間の判断され

表２－６　各判断カテゴリーの生起頻度

背景		白						黒					
Ssの明度		12			15			12			15		
判断		＋	0	－	＋	0	－	＋	0	－	＋	0	－
観察者	T. H	8	0	0	8	0	0	0	0	8	0	0	8
	I. K	3	0	5	3	0	5	3	2	3	5	0	3
	Y. I	8	0	0	5	3	0	0	7	1	0	0	8
	M. S	0	0	8	0	0	8	8	0	0	8	0	0
	Y. O	2	0	6	3	0	5	7	0	1	3	1	4
	O. T	0	0	8	0	0	8	8	0	0	8	0	0
	Y. S	0	0	8	0	0	8	8	0	0	8	0	0
	S. H	8	0	0	8	0	0	7	0	1	8	0	0
	T. M	8	0	0	8	0	0	5	3	0	8	0	0
	K. S	0	0	8	0	0	8	0	0	8	0	0	8

注）Ssは標準刺激を表す。

た奥行量を、全被験者のデータを込みにして、＋、－の判断別に平均した結果を図２－９に示す。図から明らかなように、判断された奥行量は、白背景では標準刺激が暗いほど、黒背景では標準刺激が明るいほど、すなわち標準刺激面と背景面の明るさの差が大きいほど増加する傾向が得られた。

考察

先に仮定した標準刺激面と背景面の図－地関係に関する個人タイプは全て確認された。また、見えの個人内での安定性もほぼ確認された。ただし、どの条件においても＋と－の両判断が現れる、すなわち標準刺激面と背景面との図－地関係の反転を示唆する被験者も2名（I. KとY. O）いた。実験５における距離判断の結果にはこのタイプに相当する個人例は見られなかったが、このような被験者の存在は、標準刺激面の距離が変動して見えることがあるという内観報告と一致する。また、両面の明るさの差違が増すほど両面間の奥行感が増すことも示された。したがって、先述の四つの仮定は確認されたと結論できよう。

４－６　図－地知覚説の一般化

実験５の結果を説明するために提案された図－地知覚説の適用範囲を拡大するために、その諸仮定を次のように一般化する。

（１）視野あるいは網膜像内の明るさの異なる隣接二領域（距離判断実験の刺激布置では判断の対象領域とその背景領域）は図－地関係をなし、図になった領域は地になった領域の前方に定位する。

（２）どちらの領域が図になるかは図－地分化の一般的規則性にしたがい、条件によっては図－地関係が反転する。

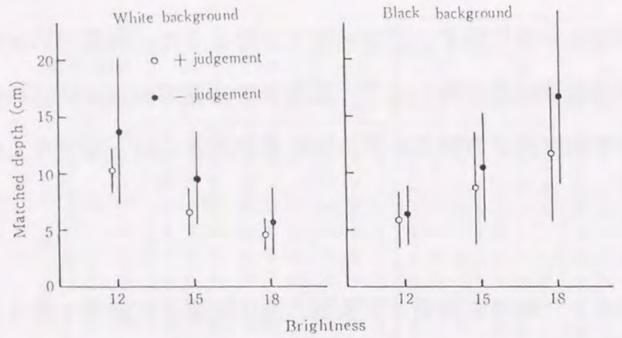


図２－９　判断された奥行と標準刺激面の明るさとの関係。横軸は標準刺激の色研明度番号であり、図中の縦線分は標準偏差を表す。

（３）どちらの領域が図になるかに関わりなく、領域間の知覚的奥行量は領域間の明るさの差違の増加にともなって増加する。

これらの仮定から距離判断への明るさの効果一般は次にように説明される。実験５においては、衝立の窓を通して見える標準刺激面と背景面は左右に並んでおり、かつ大きさが等しかった。そのため、両者の図－地関係が不確定となり、それが明るさの効果の個人差につながったと解釈された。しかし、他の研究の刺激布置においては、小さい判断対象領域を広い背景領域が取り囲んでいるのが普通である。たとえば、暗室で透過光面を刺激として提示する場合、背景をなす「闇」は判断対象を囲んで視野全体に広がっている（図２－１０ａおよびｂを参照。ただし、図では黒く広い背景面上に明るい灰色と暗い灰色の小さい判断対象面が存在する場合を示してある）。そして、一般に囲む領域やより大きい領域が地の性質を帯びやすいので、背景領域は地として、対象領域は図として安定する（図２－１０ｃのような見えが一義的に成立する）。その結果、明るさの効果に個人差は現れず、実験５のタイプＡの見え方、すなわち背景との明るさの差違の大きい対象ほどより近いという見え方（明るさの差違に応じて図２－１０ｃの点線矢印が示す奥行に差が生じ、それが実線矢印が示す見えの距離の差につながる）が一般的になるというわけである。

第５節　図－地知覚説の実験的検討１

実験５の結果を解釈するに当たって、標準刺激面と背景面の間に物理的に80cm の距離がある刺激布置においても、両者が同一平面上にある場合と同様の図－地関係が成立すると見なした。しかし、この刺激布置

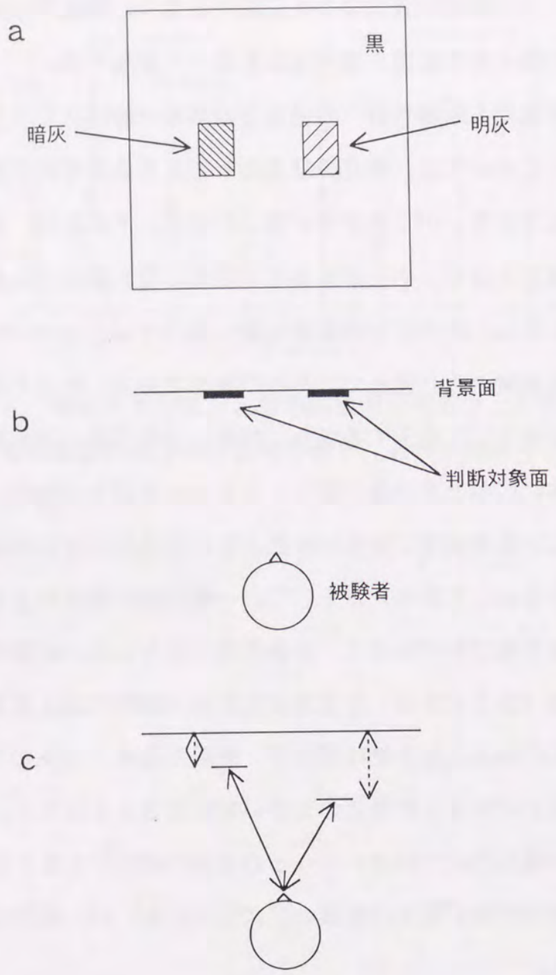


図２－１０　物理的な刺激布置（ａ、ｂ）と図－地知覚説が予測する見え（ｃ）。ａは被験者から見た刺激面を表す。ｃの点線矢印は図と地の分化による奥行、実線矢印は被験者が判断する距離を表す。

は図－地知覚の研究に用いられるものとは異質である。そこで、実験７（江草，1977c において実験Ⅰとして報告）、実験８（江草，1977c において実験Ⅱとして報告）、実験９（Egusa，1983において実験１として報告）において、通常の図－地知覚の実験と同様に、判断の対象となる隣接二領域が物理的に同一平面上にある刺激布置を用い、また判断方法を変更して、実験６の結果の一般性、すなわち前述の一般化された仮定の妥当性を確かめることにした。

５－１　実験７

方法

被験者　25名の大学生であった。

装置と刺激　刺激は板に紙を貼ったもので、タキストスコープ（竹井機器製、DP-6）によって観察距離80cm の位置に1秒間提示された。判断対象となるのは一辺5cm（視角にして3° 35′）の正方形で、明るさの異なる長方形の左右二領域に等分されていた（図２－１１を参照）。

左の領域は白または黒で、ポスターカラーが塗られた。右半分は３種類の灰色標準色紙（色研番号は0-12-0、0-15-0、0-18-0。マンセル表示はN2. 8/0. 0、N4. 7/0. 0、N7. 1/0. 0）のいずれかが貼られた。正方形の周囲には黒ラシャ紙が貼られた。刺激面の照度は130lx であった。

手続　被験者は両眼で観察し、正方形内の左右二領域のどちらが手前に見えるか、あるいはどちらとも言えないか、を口頭で報告した。左右の色の組合せによる6種類の刺激がランダムな順序で2回ずつ提示された。

結果

全被験者を込みにした、各刺激に対する総数50回の判断の内訳を表２

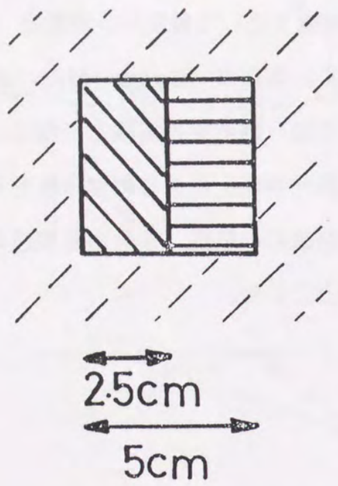


図２－１１　刺激図形。右下がりの斜線部分は白または黒、横線部分は灰色である。破線部分は黒ラシャ紙である。

－７に示す。左が黒の場合は右の灰色領域が、左が白の場合は白の領域が、すなわち隣接二領域のうちより明るい方が手前に見えやすいという傾向が明瞭であった。灰色の3条件を込みにした場合、黒条件では、より明るい側が手前と判断された回数が88、より暗い側が手前と判断された回数が29であった。白条件では、より明るい側が手前と判断された回数が、より暗い側が手前と判断された回数が29であった。これらの判断カテゴリー間の頻度差は統計的に有意であった（黒：$\chi^2(1)=29.75$, $p<0.01$。白：$\chi^2(1)=62.06$, $p<0.01$）。

また、左が黒の場合は暗い灰色との組合せほど、白の場合は明るい灰色との組合せほど、すなわち両領域の明るさの差違が小さいほど、どちらとも言えないという判断の頻度が低くなった。この頻度差も統計的に有意であった（黒：$\chi^2(2)=17.02$, $p<0.01$。白：$\chi^2(2)=11.85$, $p<0.01$）。

考察

図－地反転図形においては周囲との明るさの違いの大きい領域ほど図になりやすいことが知られている（大山，1969）。たとえば、大山・笹本（1957）は、図２－１２のような直径5cmの円を六つの扇形に等分した図形を提示し、被験者にαとβのどちらの形が「図」となって見えたかを報告させた。円の周囲18cm四方は中程度の明るさの灰色（色研番号が15）で、α部分とβ部分には灰色の6種類の組合せ（色研明度番号が10と15、11と16、12と17、13と18、14と19、15と20）が用いられた。観察距離は61cm、刺激面の照度は200lxであった。提示時間は0.2、0.5、1.0秒のいずれかで、αおよびβが図としての出現率が求められた。その結果、周囲との明るさの差が大きい領域（たとえば、11と16の組合せなら11の領域、14と19の組合せなら19の領域）の方が図になりやすいこと

表２－７　各判断カテゴリーの生起頻度

	Right half					
	12		15		18	
	Left half					
Judgment	White	Black	White	Black	White	Black
Right	3	27	7	23	4	38
Ambiguous	6	20	12	10	21	3
Left	41	3	31	17	25	9

注）12、15、18は明度番号である。Judgment欄のRightは右側が手前という判断、Leftは左側が手前という判断、Ambiguousはどちらともいえないという判断を表す。

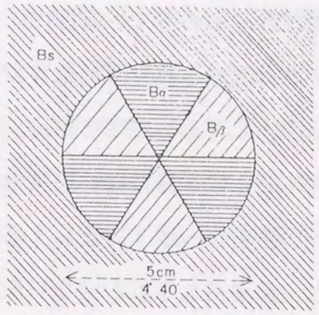


図２－１２　大山・笹本（1957）の刺激図形

が示された。

本実験では正方形の周囲が黒であるので、周囲との明るさの差違が大きいのは白－灰色の条件では白領域、黒－灰色条件では灰色領域である。これらは隣接二領域のうちのより明るい方でもある。したがって、より明るい領域が手前に見えやすいという結果は、図になりやすさの条件に関する大山・笹本（1957）の報告と一致するといえる。また、左が黒なら右が暗い灰色の場合ほど、左が白なら右が明るい灰色の場合ほど、すなわち二領域間の明るさの差違が小さいほど前後関係が不明という判断の頻度が高かった。この不明の判断が二領域間の見えの奥行量が少ないことを反映しているのなら、この結果は実験６の結果と一致する。しかし、不明判断は単に見えの奥行が存在しないことを反映しているのかもしれない。図－地分化には様々な段階があり、図と地に関する他の現象的特性は成立していても、図が地の前方に定位するという特性が現れないこともある（大山，1969）からである。

５－２　実験８

実験７の判断手続では、二領域間の見えの奥行量に関して間接的な結論しか引き出せなかったので、実験８では被験者に見えの奥行量を直接見積もらせることにした。

方法

被験者　10名の大学生であった。

装置と刺激　装置は図２－１３の模式図ようなものであった。刺激は板に幅3cm（視角にして2° 9′）の2枚の色紙を左右に並べ境を接するように貼ったもので、色紙の周囲には黒ラシャ紙が貼られた。刺激面は

2本の蛍光灯によって約325lx の照度で照明された。被験者は縦5cm、横15cm の口を持ち、長さ30cm の内部を黒く塗った筒を通して80cm の距離から刺激面を観察した。図２－１４に示されるように、筒を通しての視野の中央には2本の帯が見え、その上下端は筒に遮られて見えなかった。残りの部分（図の破線部分）は黒ラシャ紙の面で占められた。左右の帯の色は実験７で用いられた白、黒、3種の灰色を相互に組み合わせた10種類であった。

手続　被験者は、両眼で観察し、2本の帯に境目において、どちらの帯がどれぐらい手前に見えるかを任意の単位（cm、mm など）を用いて口頭で報告した。10種の刺激は左右の帯の配置を逆にして各1回ずつ計2回ランダムな順序で提示された。

結果

被験者ごとの、各刺激に対する2回の評定値の平均を表２－８に示す。どの被験者においても、2本の帯の明るさの差違が大きいほど判断された奥行が大きくなる傾向が見られた。一方が黒、白、暗い灰色（色研明度番号12）または明るい灰色（明度番号18）の場合、Friedman 検定の結果、この傾向は1%水準で統計的に有意であった（各々、$\chi^2(3)=24.03$、$\chi^2(3)=28.45$、$\chi^2(2)=19.54$、$\chi^2(2)=19.54$）。一方が中間の灰色（明度番号15）ならば、他方が暗い灰色の場合より黒の場合の方が、10名の被験者中9名において判断された奥行が大きかった。また、他方が明るい灰色の場合より白の方が8名の被験者において判断された奥行が大きかった。二項検定の結果、前者の人数差は5%水準で有意であったが、後者の差違は有意ではなかった。

手前と判断された頻度に関しては、ほとんど常に明るい側を手前と判断した被験者が7名（K. M、M. S、Y. O、O. T は全判断、H. S と K. T は

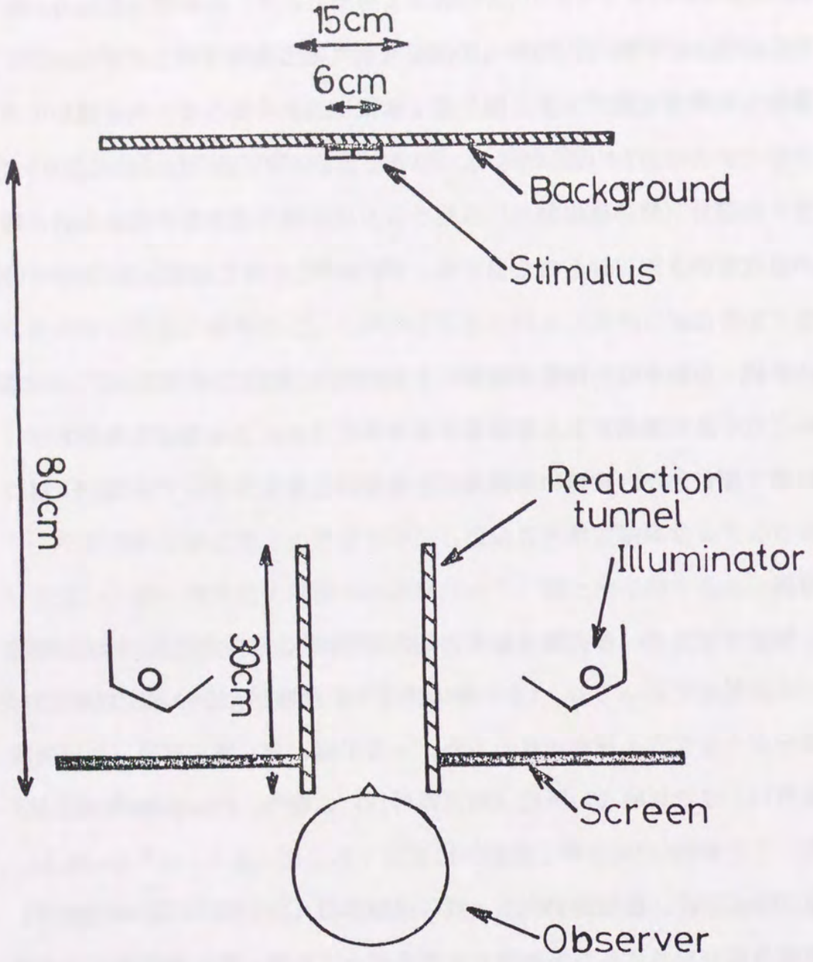


図２－１３　装置の略図

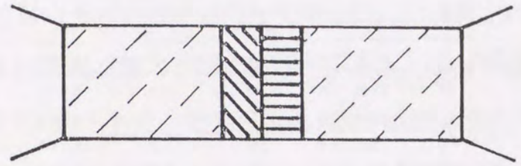


図２－１４　刺激の見え方。右下がり斜線部および横線部が刺激面を構成する2本の帯を示す。破線部はラシャ紙の面である。

表２－８　判断された奥行

Observer K.M (cm)

Brightness	Black	12	15	18	White
Black		4.0	12.0	26.5	42.5
12	4.0		5.0	14.0	20.0
15	12.0	5.0		10.0	12.5
18	26.5	14.0	10.0		8.5
White	42.5	20.0	12.5	8.5	

Observer K.T (cm)

Brightness	Black	12	15	18	White
Black		0.8	3.5	11.0	15.5
12	0.8		1.3	5.5	13.5
15	3.5	1.3		1.8	7.0
18	11.0	5.5	1.8		1.5
White	15.5	13.5	7.0	1.5	

Observer T.M (mm)

Brightness	Black	12	15	18	White
Black		3.0	3.0	3.0	4.0
12	3.0		1.5	2.0	2.5
15	3.0	1.5		1.5	2.0
18	3.0	2.0	1.5		1.5
White	4.0	2.5	2.0	1.5	

Observer Y.O (mm)

Brightness	Black	12	15	18	White
Black		2.5	3.5	8.0	9.0
12	2.5		2.5	4.5	8.0
15	3.5	2.5		4.0	4.5
18	8.0	4.5	4.0		2.0
White	9.0	8.0	4.5	2.0	

Observer I.K (cm)

Brightness	Black	12	15	18	White
Black		0.75	0.50	1.00	0.75
12	0.75		0.35	0.75	0.75
15	0.50	0.35		0.75	0.50
18	1.00	0.75	0.75		0.40
White	0.75	0.75	0.50	0.40	

Observer M.S (cm)

Brightness	Black	12	15	18	White
Black		0.5	1.0	3.0	4.0
12	0.5		0.5	2.0	3.5
15	1.0	0.5		1.5	2.5
18	3.0	2.0	1.5		2.0
White	4.0	3.5	2.5	2.0	

Observer A.T (cm)

Brightness	Black	12	15	18	White
Black		1.00	2.50	4.00	3.50
12	1.00		0.75	2.50	3.00
15	2.50	0.75		1.50	1.50
18	4.00	2.50	1.50		1.25
White	3.50	3.00	1.50	1.25	

Observer O.T (cm)

Brightness	Black	12	15	18	White
Black		0.35	0.40	0.90	0.90
12	0.35		0.30	0.50	1.00
15	0.40	0.30		0.35	0.50
18	0.90	0.50	0.35		0.30
White	0.90	1.00	0.50	0.30	

Observer Y.N (cm)

Brightness	Black	12	15	18	White
Black		0.50	0.50	1.00	2.00
12	0.50		0.50	0.75	1.00
15	0.50	0.50		0.50	0.75
18	1.00	0.75	0.50		0.75
White	2.00	1.00	0.75	0.75	

Observer H.S (cm)

Brightness	Black	12	15	18	White
Black		1.00	2.00	5.00	8.00
12	1.00		1.00	3.50	7.50
15	2.00	1.00		2.50	4.50
18	5.00	3.50	2.50		1.25
White	8.00	7.50	4.50	1.25	

注）被験者名の横の（cm）や（mm）は報告に用いられた単位を示す。表中の12、15、18は明度番号である。

20回中18回、A. T は17回）、右側を手前と見る傾向の強い者が2名（T. M およびY. N ともに20回中17回）であった。二項検定の結果、これらの頻度差は全て1%水準で有意であった。また、偏った傾向の見られぬ者も1名（I. K）見られた（右側－手前判断が20回中8回、明るい側－手前判断12回。いずれの場合も逆の判断との頻度差は統計的には有意ではなかった）。

考察

奥行量の判断に関する結果から、実験６の結果が、異なる刺激布置や判断方法にも共通するものであることが確認された。

しかし、手前と判断される頻度に関する結果は、実験６のものとはやや異なった。既に述べたように、実験６では、暗い方を手前と見やすい者や左側を手前と見やすい者を含めて様々な傾向を示す被験者がほぼ均等に現れており、明るい方を手前と見る被験者数が突出して多いということはなかった。この差違が偶然的なものという可能性もあるが、実験６と本実験とでは、刺激布置に一つ大きな違いがあり、それが結果の差異を生んだ可能性もある。それは、この実験では判断の対象領域（隣接する2本の帯）と周囲の領域とが同一平面にあったのに対して、実験６では周囲の領域は被験者と対象面との中間に位置する衝立の面であり、対象面と衝立（周囲の領域）との奥行が明瞭に知覚できる状況にあったことである。

５－３　実験９

実験６と実験８の結果の不一致の原因を探るため、実験９（Egusa, 1983において実験１として報告）では、同一平面上の二領域を視野制限

用の小開口を通して観察するという実験６と類似した刺激布置と、実験８と同様な条件、判断方法を採用した。すなわち、図２－１５ａのような物理的刺激布置を用い、ｂまたはｃのような見えを仮定して、図の点線矢印が示す隔たりを判断させた。

方法

被験者　視力、色覚ともに正常な（ただし、視力については矯正視力も含む）大学生15名であった。

装置と刺激　装置の模式図を図２－１６に示す。被験者は、2枚の色紙を境が接するように左右に並べた刺激面を長さ75cm の内部を黒く塗った筒を通して観察した。筒の刺激面側の開口部は縦5cm（視角にして3°49′）、横3cm（視角にして2°18′）の長方形であった。刺激面は筒の末端から20cm 離れた位置に垂直に立てられ、2本の蛍光灯によって照度が325lx になるように照明された。筒を通しての視野は刺激面で占められ、左右の領域の境界が視野の中央に位置していた。

刺激は、黒（マンセルバリュー2.0以下）、3種の灰色（マンセルバリューは2.8、4.7、7.1）、白（マンセルバリュー9.0以上）の相互の組合せによる10種類であった。

手続　被験者は、両眼で観察し、2領域の境界部において、どちらの領域がどれぐらい手前に見えるかを任意の単位（cm、mm など）を用いて口頭で報告した。10種の刺激は左右の色の配置を逆にして各1回ずつ計2回ランダムな順序で提示された。

結果

被験者ごとの、各刺激に対する2回の評定値の平均を表２－９に示す。明らかに、2領域の明るさの差違が大きいほど判断された奥行が大きくなった。一方が黒、白、暗い灰色（マンセルバリュー2.8）または明るい灰

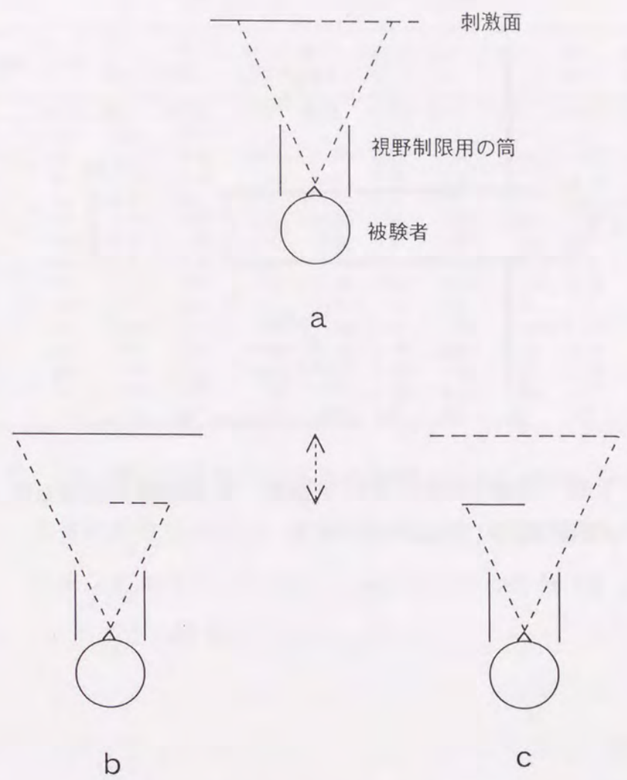


図２－１５　物理的な刺激布置（ａ）と仮定された見え（ｂ、ｃ）。ａの実線と破線は明るさの異なる隣接二領域を表す。ｂは破線領域が図となり実線領域が地となった場合を表し、ｃはその逆を表す。点線矢印は図－地分化による奥行を表す。

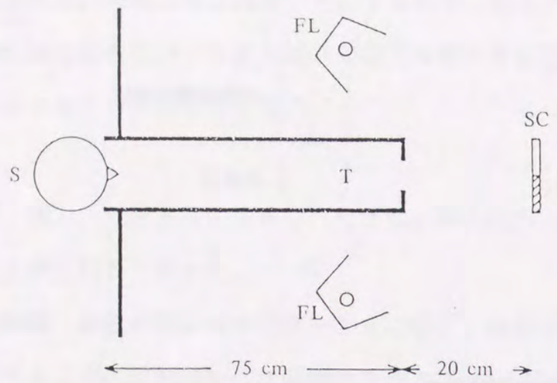


図２－１６　装置の略図。Ｓは被験者、Ｔは視野制限用の筒、SC は刺激面、FL は蛍光灯である。

表２－９　判断された奥行

Subject	Unit	B/DG	B/MG	B/LG	B/W	DG/MG	DG/LG	DG/W	MG/LG	MG/W	LG/W
1	cm	20.0	55.0	77.5	105.0	12.5	62.5	85.0	30.0	55.0	20.0
2	mm	3.0	7.0	11.5	12.5	2.5	6.5	6.5	3.0	6.0	2.5
3	cm	2.25	8.50	10.00	10.00	2.00	5.00	10.00	3.00	6.50	2.00
4	cm	0.30	0.90	1.20	1.20	0.20	1.00	1.20	0.30	0.75	0.20
5	cm	20.0	40.0	100.0	100.0	15.0	30.0	75.0	17.5	40.0	15.0
6	cm	0.70	5.50	12.00	14.50	0.90	7.00	13.00	1.75	9.00	2.50
7	mm	0.60	1.75	2.50	2.00	0.35	1.25	1.50	0.15	1.50	0.30
8	mm	3.0	6.5	6.5	7.5	1.5	3.0	6.0	1.5	3.0	2.5
9	cm	1.25	3.50	3.50	5.00	1.00	2.50	2.50	1.50	3.50	0.75
10	mm	1.0	2.0	6.0	4.0	1.5	1.5	2.0	1.0	1.0	2.0
11	cm	0.75	1.75	2.50	3.00	1.00	2.00	2.50	1.00	1.50	0.75
12	cm	0.75	10.00	10.00	17.50	1.50	3.00	12.50	0.75	1.50	1.50
13	cm	1.40	1.25	3.00	4.50	0.45	1.90	2.50	0.90	1.25	0.75
14	cm	2.25	6.50	6.50	7.50	1.25	6.50	6.00	0.75	1.00	1.50
15	mm	1.5	3.5	7.5	10.0	2.0	4.0	3.0	2.0	2.5	2.0

注）Unit 欄は報告に用いられた単位である。B/DG などは明るさの組合せを表し、B は黒、W は白、DG は暗い灰色（マンセルバリュー2.8）、MG は中間の灰色（4.7）、は明るい灰色（7.1）である。

色（マンセルバリュー7.1）の場合、この傾向は、Friedman 検定の結果、1%水準で統計的に有意であった（各々、$\chi^2(3)=39.71$、$\chi^2(3)=39.60$、$\chi^2(2)=25.30$、$\chi^2(2)=29.53$）。一方が中間の灰色ならば、他方が暗い灰色の場合より黒の場合の方が、15名の被験者全員において評定値が大きかった。また、他方が明るい灰色の場合より白の方が、14名の被験者において評定値が大きかった。これらの傾向はいずれも、二項検定の結果、1%水準で統計的に有意であった。

手前と判断された頻度に関してはやはり個人差が見られた。15名中7名においては、2領域のうちの明るい方が手前と判断されやすかった（被験者1、2、3、4、5は全判断、被験者6と7は20回の判断中18回）。被験者8、9、10、11、12の5名は、逆に、暗い方を手前と判断する傾向（各々、20回の判断中20、20、18、17、15回）を示した。二項検定の結果、これらの傾向は全て1%または5%水準で統計的にも有意であった。他の3名は統計的に有意な傾向を示さなかった。被験者13では明るい方を手前とする判断が20回中13回、右側を手前とする判断が9回であった。被験者14では明るい方を手前とする判断が10回、右側を手前とする判断が12回であった。被験者15の場合は両種の判断とも20回中10回であった。

考察

見えの奥行量に関する結果は実験６や８と一致するものとなったが、見えの前後関係に関しては、実験６と類似し、実験８とはとは異なる傾向が得られた。どうやら、隣接二領域のうち、周囲との明るさの差違の大きい領域が前方に定位する、あるいは図として知覚されるという傾向は、二領域とその周囲の領域との間に奥行が存在する場合には弱まるようである。ただし、地の前方に定位すること以外の図の特性を指標とした場合にも同様な結果が得られるかは、未だ確かめられてはいない。

５－４　実験７、８、９の結果のまとめ

隣接二領域間に知覚される前後関係の個人差に関しては、実験８、９の結果は必ずしも一致しなかった。しかし、知覚される奥行量が両領域の明るさの差違にともなって増加するという傾向は、実験６も含めて全ての実験結果に共通しており、刺激布置や判断方法の差違を越えた一般的なものといえる。したがって、４－６で述べた図－地知覚説の一般的仮説は確認されたと結論できよう。

第６節　図－地知覚説の実験的検討２

６－１　新しい進出後退現象の可能性

これまでの諸実験から、図－地知覚説を構成する諸仮定を裏付けるデータが得られた。そこで、図－地知覚説の妥当性をさらに検討するため、この仮説から新しい進出後退現象の可能性を演繹し、その予測の実験的検証を行った。

繰り返しになるが、この説は、（１）視野における距離判断の対象となる領域とそれに隣接する背景領域とが知覚上で図と地の関係をなし、図となった領域は地となった領域の前方に定位される、（２）どちらの領域が図になるかは図－地分化の一般的規則性にしたがう、（３）どちらの領域が図になるかに関わりなく、両者の間の知覚的奥行量は両者の明るさの差が大きいほど増す、という仮定に基づいている。通常の距離知覚実験の刺激布置では、視野は比較的小さな互いに分離した二つの対

象領域と、それらに隣接し、それらを取り囲む、より大きな「背景」領域（ここでは、この語を前後関係を特定しない、周囲の領域という意味で用いる）からなる。このような刺激布置の場合、隣接二領域のうち囲まれた領域やより小さい領域が図になりやすいという図－地知覚の一般的傾向から、対象領域が図になると考えられる。そして、上記の仮説に従えば、対象領域はいずれも背景領域の前方に浮き出して知覚され、背景領域との明るさの差違の大きい対象領域ほど浮き出す程度が増すと予測される（図２－１０および以下の図２－１７を参照）。言い換えると被験者からより近く見えるということである。この予測が多くの研究結果と一致することは既に述べた。

では、もし対象領域が地として知覚される場合はどうであろうか。上記の仮説からは、対象領域は背景領域の後方に、しかも背景領域との明るさの差違の大きな対象領域ほどより後方に定位されることが予測される。すなわち、通常の進出後退現象とは逆の、背景との明るさの差違が大きい対象領域ほど「遠く」見えるという結果が予測されることになる（図２－１８を参照）。

そこで、実験１０（Egusa，1982において実験１として報告）では多くの研究と同様な、対象領域が図となりやすい刺激布置を用い、実験１１（Egusa，1982において実験２として報告）では対象領域が地となりやすい刺激布置を設定して、上記の予測を確認した。

６－２　実験１０

図－地反転図形を用いた研究からは、隣接二領域の一方の領域が小さくなるほど、その領域が図になりやすくなることが知られている（たと

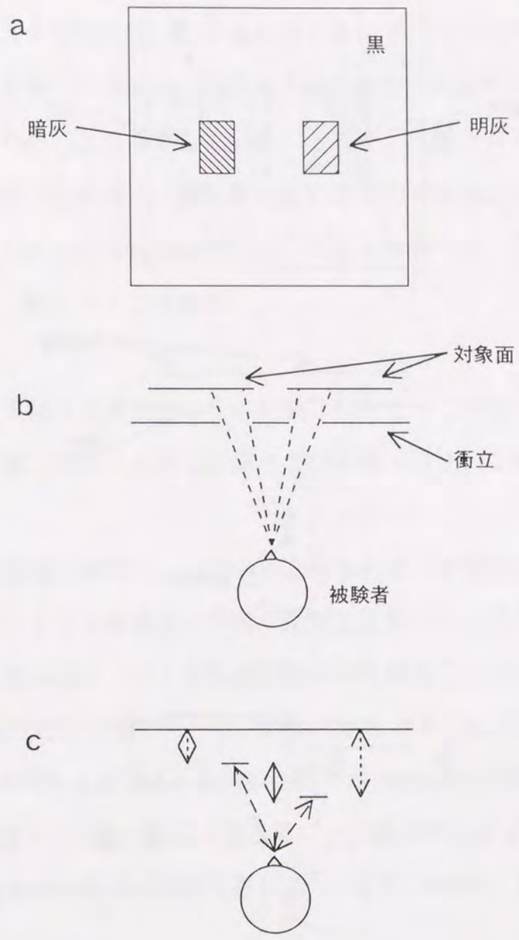


図２－１７　実験１０の物理的な刺激布置（ａ、ｂ）と図－地知覚説が予測する見え（ｃ）。ａは被験者から見た刺激面を表す。ｃの点線矢印は図と地の分化による奥行、破線矢印は対象領域の見えの距離、実線矢印は被験者が判断する奥行を表す。

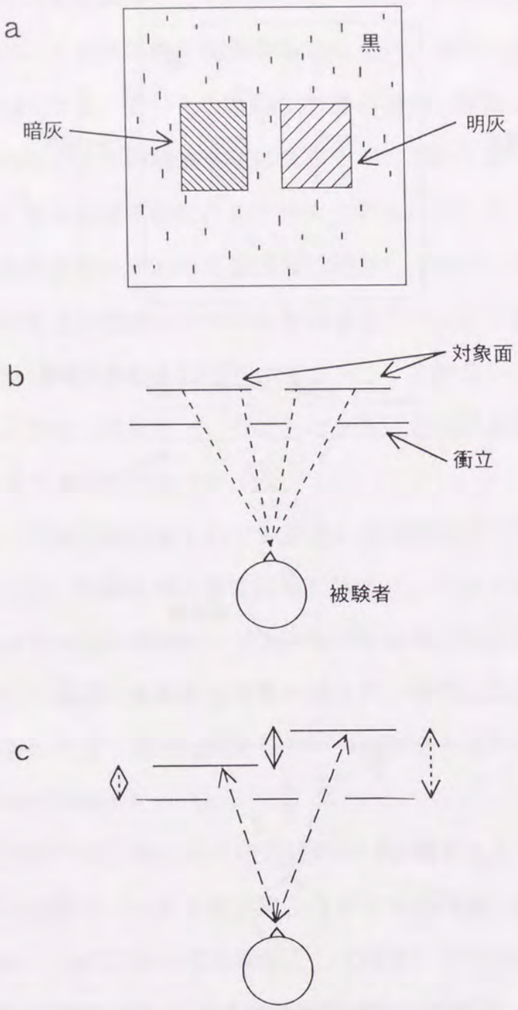


図２－１８　実験１１の物理的な刺激布置（ａ、ｂ）と図－地知覚説が予測する見え（ｃ）。ａは被験者から見た刺激面を表す。ｃの点線矢印は図と地の分化による奥行、破線矢印は対象領域の見えの距離、実線矢印は被験者が判断する奥行を表す。

えば、Frisch & Julesz, 1966; Oyama, 1960）。また、Gibson & Dibble (1952)は、大きな面に空いた小さな穴を通して、穴を満たしている背後の面を見る場合、穴の領域が手前の大きな面の上に置かれた小さな面として知覚されることも指摘している。そこで、実験１０では、対象領域が図となりやすいように、被験者の前に色が均一な衝立を立て、衝立に開けられた小さな穴の背後に色が均一な面を提示して、穴の領域を判断対象とした（図２－１７を参照）。

方法

被験者　実験３の被験者15名が実験３に先だって参加した。

装置と刺激　実験３と同じ装置および刺激（図２－１を参照）が用いられた。

手続　被験者の課題は、左右の長方形のどちらが手前に見えるかを判断し（図２－１７の破線矢印が示す距離を比較し）、さらに両者の間の見えの奥行量（図２－１７の実線矢印が示す隔たり）を任意の単位（cm、mmなど）で見積もって、口頭で報告することであった。対象色彩面の2種の対（G1-G4とG2-G3。数字が大きいほど明るい灰色であることを表す）と2種の衝立（白と黒）との組合せによる4条件は、対をなす対象色彩面の左右の配置を逆にして1回ずつ計2回、ランダムな順序で提示された。

結果

各対象色彩面が手前と判断された頻度の全被験者にわたる合計を表２－１０の上段に示す。4条件のいずれにおいても、衝立との明るさの差違のより大きい対象色彩面がより近いと判断されやすかった。検定の結果、これらの頻度差は統計的にも有意であった（黒衝立のG1-G4条件では、$\chi^2(1)=26.13$, $p<0.01$。黒衝立のG2-G3条件では、$\chi^2(1)=13.33$, $p<0.$

01。白衝立のG1-G4条件では、$\chi^2(1)=4.80$, $p<0.05$。白衝立のG2-G3条件では、$\chi^2(1)=4.80$, $p<0.05$）。

各衝立条件における4回の判断が全て上記の一般的傾向と一致した被験者について、判断された奥行量の平均値を求めた結果は表２－１１のようになった。黒衝立の条件では該当する被験者10名全員において、また白衝立の条件では4名中3名において、G2-G3条件よりG1-G4条件の方が判断された奥行量が大きかった。

６－３　実験１１

先に述べたように、図－地分化が起こりうる事態では、ある領域が小さいほど、その領域の図になりやすさは増す。また、内部に色のむらやきめを含む領域は図あるいは硬い表面として知覚されやすいことも指摘されている（Gibson & Dibble, 1952; Koffka, 1935; Natsoulas, 1963）。そこで、実験１１では、対象領域が地になりやすいよう、実験１０で用いた衝立の穴を大きくするとともに、衝立の色に不規則なきめを与えた（図２－１８を参照）。

方法

被験者　実験１０の参加者とは別の視力正常な（矯正視力も含む）大学生15名であった。

装置と刺激　実験１０の装置が用いられたが、表面に細かい木目のあるベニヤ板に塗料を塗ったものを材料にすることにより、衝立の面に細かい不規則なきめを与えた。色は黒と白で、輝度は4cd/m^{2}および227 cd/m^{2}であった。穴の大きさは縦7.83°、横6.03°で、二つの穴の間隔は3.02°であった。他の設定は実験１０と同じであった。筒を通しての

表２－１０　より近いと判断された回数

Experiment	Black screen		White screen	
	G_1-G_4	G_2-G_3	G_1-G_4	G_2-G_3
1	1 29	5 25	21 9	21 9
2	21 9	22 8	4 26	7 23

注）Experiment欄の1は本文中の実験１０を、2は実験１１を示す。

表２－１１　判断された奥行（cm）

Subject	Black screen		White screen	
	G_1-G_4	G_2-G_3	G_1-G_4	G_2-G_3
1	15·00	2·50	–	–
2	–	–	3·50	2·00
3	20·00	7·50	–	–
4	8·50	4·50	7·00	6·50
5	–	–	–	–
6	5·00	1·00	–	–
7	–	–	–	–
8	8·50	1·00	–	–
9	2·50	2·00	–	–
10	1·50	1·00	–	–
11	3·00	1·25	2·50	1·00
12	4·00	2·00	–	–
13	7·50	3·50	–	–
14	–	–	2·50	3·00
15	–	–	–	–

視野は、二つの比較的大きく色の均一な長方形の領域（対象色彩面）と細かいきめを持った周囲の領域（衝立）から構成されていた。

予備観察により、この刺激布置が、きめのある壁に空いた窓を通して色の均一な背景が見えている、という知覚を生じうることが確認された。しかし、この見え方は実験１０の場合ほど安定したものではなく、穴の領域（対象色彩面）が衝立より手前に見える場合もあることが示された。

手続　被験者の課題は基本的には実験１０と同じであったが、対象領域のどちらか一方でも周囲の領域の手前に見えた場合は、その旨を報告して判断を打ち切るように手続を修正した。そして、そのような報告があった試行は後に再度実施した。

結果

各対象色彩面が手前と判断された頻度の全被験者にわたる合計は表２－１０下段のようになった。実験1とは逆に、4条件のいずれにおいても、衝立との明るさの差違のより大きい対象色彩面がより遠いと判断されやすかった。検定の結果、これらの頻度差は統計的にも有意であった（黒衝立のG1-G4条件では、$\chi^2(1)=4.80$, $p<0.05$。黒衝立のG2-G3条件では、$\chi^2(1)=6.53$, $p<0.05$。白衝立のG1-G4条件では、$\chi^2(1)=16.13$, $p<0.01$。白衝立のG2-G3条件では、$\chi^2(1)=8.53$, $p<0.01$）。

各衝立条件における4回の判断が全て上記の一般的傾向と一致した被験者について、判断された奥行量の平均を表２－１２に示す。この場合の傾向は実験１０と同じで、黒衝立の条件では該当する被験者8名中の7名において、また白衝立の条件では8名中6名において、G2-G3条件よりG1-G4条件の方が判断された奥行量が大きかった。

６－４　実験１０、１１についての考察

表２－１２　判断された奥行（cm）

Subject	Black screen		White screen	
	G_1-G_4	G_2-G_3	G_1-G_4	G_2-G_3
1	2·50	2·00	–	–
2	12·50	1·25	12·50	2·00
3	4·50	3·00	–	–
4	6·00	0·75	–	–
5	–	–	1·50	1·50
6	3·00	2·00	–	–
7	–	–	2·00	3·00
8	·10·00	4·00	–	–
9	20·00	20·00	17·50	3·00
10	–	–	15·00	3·50
11	–	–	7·50	1·50
12	5·50	1·00	–	–
13	–	–	5·00	2·00
14	–	–	–	–
15	–	–	10·00	3·00

二つの対象領域間の見えの前後関係についての実験１０および１１の結果は、先に述べた図－地知覚説に基づく予測とみごとに一致した。そして、これらの結果は先に述べた他の三つの説のいずれを持ってしても説明不可能である。なぜなら、それらの説は対象の明暗あるいは背景とのコントラストによって一義的に見えの距離が決まるとしているが、上記の結果は必ずしもそうではないことを示しているからである。

また、知覚された奥行量は、周囲領域の明るさや対象領域と周囲領域の図－地関係に関わりなく、対象領域間の明るさの差違にともなって大きくなった。この結果もまた図－地知覚説を支持するものといえる。図－地知覚説では、視野内の隣接二領域間に生じる見えの奥行量は、二領域の見えの前後関係に関わりなく、領域間の明るさの差違にともなって増大すると仮定している。これは、上記実験の刺激布置においては、周囲領域との明るさの差違の大きい対象領域ほど、知覚上で周囲領域から前方または後方に分離する程度（図２－１７ｃおよび図２－１８ｃの点線矢印が示す隔たり）が大きいことを意味する。すなわち、黒衝立条件では G4＞ G3＞ G2＞ G1の順に、白衝立条件では G1＞ G2＞ G3＞ G4の順に、対象領域が周囲領域から分離する程度は大きくなる。そして、この分離の程度の差違が二つの対象領域間の奥行（図２－１７ｃおよび図２－１８ｃの実線矢印が示す隔たり）となって現れるのである。上記の不等式より、分離の程度の差違、すなわち対象間の奥行量は、衝立の色に関わりなく、G2-G3の対より G1-G4の対の方が大きいことは明らかである。また、実験１０では対象領域が二つとも周囲領域から前方に分離し（図２－１７ｃ）、実験１１では後方に分離する（図２－１８ｃ）が、このことは、対象領域間の前後関係を逆にするだけで、奥行量には

影響しない。したがって、得られた結果通りの予測となる。

第７節　単眼視の場合の色相の効果

単眼視と両眼視で大差のない明るさの効果に対して、色相の効果は単眼視と両眼視で大きく異なることが知られている。そこで、両条件について別々に、色相の効果の現れ方とその生起のしくみについての仮説とを検討することにする。最初に単眼視の場合を見てみよう。

７－１　諸研究

古くは Einthoven (1885)がこのテーマを研究している。彼は、被験者から約3m の距離にある黒い衝立上に赤と青の紙で作ったアルファベットの文字を提示した。その結果、両眼視では両者の間に距離の差違を知覚した被験者でも、単眼視にすると見えの距離の差違が消失することが示された。

Luckiesh (1918)は、暗黒中に2個の透過光刺激を左右に並べて提示した。刺激は、縦2.2cm 横1.5cm のアルファベットのＸとＥの形で、カラーフィルターにより赤と青に着色された。両眼視の場合は、9名の被験者中7名において赤が進出して知覚されたが、単眼視の場合には距離の差違は知覚されなかった。

Pillsbury & Schaeffer (1937)は、暗室内に2個の発光刺激を提示し、被験者にどちらがより近く見えるかを判断させた。一方の色は赤（ネオン燈）、他方は青（アルゴン・ネオン燈）であり、両刺激とも視角は一定であった（被験者から295cm の距離において幅0.5mm 高さ2.5cm）。

提示距離は、両刺激とも295cm、赤が345cm で青が245cm、赤が245cm で青が345cm のいずれかであった。その結果、どの提示距離条件でも15名の被験者中11～12名が、青をより近いと判断する傾向を示した。

Zajac (1953)は、明室で2本の灰色の金属棒（直径2.75mm）をフィルターを通して観察させた。1本は、被験者の正面約30cm の距離に置かれ、ニュートラルフィルターを通して凝視された。他方は、その右または左に4～5cm 離して置かれ、カラーフィルター（赤、黄、緑、青、青紫）を通して観察された。被験者の課題は、凝視棒と同じ距離に見えるように色棒の距離を調整した。その結果、等距離に見える範囲は、波長が長いほど遠くなった。すなわち、波長が長いほど近く見えることが示された。

Over (1962)は、暗黒中に2個の透過光刺激を左右に9° 離して提示した。刺激はともに、一辺3インチの正方形で、輝度は0.0447ft-L、色は赤、緑、青のいずれかであった。一方（標準刺激）は観察者から10フィートの距離に固定され、他方（比較刺激）は前後に移動可能であった。被験者は左の正方形に比べて右は近いか、遠いか、同じ距離かを報告し、等距離と判断される比較刺激の位置が測定された。その結果、測定された距離は波長が短いほど短くなった。すなわち、長波長の刺激ほど近く見えることが示された。

増田・元木（1975）は、暗黒中に2個の長方形の透過光刺激を左右に並べて提示した。長方形は縦10° 横5° の大きさで、間隔は11′ または56′であった。色は赤と緑で、輝度は3.0ft-L であった。被験者は、153cm の距離から観察し、どちらの長方形がどの程度（cm 単位）手前に見えるかを報告した。その結果、5名の被験者のうち4名において、赤の方が進出する傾向が認められた。

また、増田・元木（1977）は、暗黒中の単一の透過光刺激を両眼視する条件（この場合、両眼網膜像差の手がかりは存在しない）を設定した。刺激は円形で、その直径は5、10、20cm のいずれか、色は赤（主波長617nm）か緑（538nm）、提示距離は5、10、25、50、75m のいずれかであった。被験者は刺激までの見えの距離を m 単位で見積もった。その結果、見積もられた距離に刺激波長よる一貫した差違は見られなかった。

最近では、Troscianko, Montagnon, Clerc, Malbert, & Chanteau (1991)が、色相の勾配が面の奥行方向への傾きの知覚を生むかどうかを検討した。彼らは、コンピュータで制御された CRT ディスプレイ上に、大きさの等しい多数の有彩色の正方形を白い背景（色度座標値は x=0.26、y=0.24）上に規則的にあるいは不規則に並べた格子状の刺激パタンを提示した。正方形と背景とはフリッカー法によって等輝度（4cd/m^2）に設定された。被験者の課題は、1m の距離から視野制限用の筒を通して刺激を観察しながら、前後に傾きを自由に変えられる板を手で操作し、その傾きを刺激パタンの知覚された傾きに一致させることであった。その結果、正方形の色相が画面の下部から上部へ向けて、赤（x=0.60、y=0.35）から緑（x=0.30、y=0.49）へと徐々に変化する条件では、知覚された傾きは全ての正方形が赤である条件（色相の勾配のない条件）と差がなかった。

以上のように、単眼視の場合の色相の効果に関する諸研究の結果はまちまちである。（1）長波長の刺激が進出するというもの（増田・元木, 1975; Over, 1962; Zajac, 1953）、（2）明瞭な効果は見られないとするもの（Einthoven, 1885; Luckiesh, 1918; 増田・元木, 1977; Troscianko et al., 1991）から、（3）短波長の刺激が進出するというもの（Pillsbury & Schaeffer, 1937）まである。ただし、Pillsbury &

Schaeffer (1937)の場合、被験者全員が、実験後の質問に答えて、より近いと判断した対象がより明るく見えたと述べており、彼らの結果は明るさの効果を示すものである可能性が高い。したがって、単眼視における色相の効果は、存在するとしたら、長波長の対象が進出するというものであろう。

7－2　実験１２

諸研究の結果が一致しない、単眼視における色相の効果を確認するため、色相以外の属性を一定にして実験を行った（江草, 1984において報告）。

方法

被験者　矯正視力も含めて視力正常で、色覚も正常な大学生15名であった。

装置と刺激　実験３および１０と同じ装置（図２－１）が用いられた。衝立の色は均一な灰色（マンセルバリューが5.2～5.4）であった。対象色彩面の色は明度、彩度のほぼ等しい赤、緑、青（色研番号はそれぞれ1-15-5、12-15-5、16-15-5。マンセル表示は3.5R 4.8/5.9、5.7G 4.6/5.9、2.4PB 4.7/8.5）で、これらを相互に対にした3条件が設定された。衝立と対象色彩面の照度はいずれも690lx であった。

手続　被験者の課題は左右の対象領域のどちらが手前に見えるかを報告することであった。ただし、対象領域の一つでも衝立の背後に見えると被験者が報告した場合は、その試行を中止し後に再度実施した。他は実験１０と同じであった。

結果と考察

各対象色彩面がより近いと判断された頻度の全被験者にわたる合計は表２－１３のようになった。色の組合せによって傾向が異なり、赤を含む組合せでは色相間に差が見られなかったが、緑と青の組合せでは青の方が近いと判断されやすかった（$\chi(1)=8.53$, $p<.01$）。

この結果と先に述べた過去の報告とを考え合わせると、単眼視の場合には対象の色相は距離知覚に影響しないか、影響がある（おそらく長波長の対象ほど進出する）としても微弱なものであろう。しかし、影響がある可能性を考慮して、以下にその発生のしくみを検討しておくことにする。

７－３　眼球調節説

単眼視における色相の効果の原因として、第一に、眼球内の色収差に対応する眼球水晶体の調節の変化が挙げられてきた（たとえば、Donders：Einthoven（1885）に引用; Helmholtz, 1963/1862; Zajac, 1953）。色収差とは、光学レンズにおいて、一点から出た光であっても屈折率の違いのために波長によって結像位置が異なること、その結果として白色光の像がぼけたり、像の縁が色づいたりすることを指す。人間の眼も一種のレンズ系であるため色収差を被る。そして、対象からの光の波長が長いほど、屈折率が小さいため、明瞭な網膜像を結ぶためには水晶体を厚くして大きく屈折させる必要がある。これは、より近い位置に調節がなされる場合と同じ変化である。また、序で述べたように、水晶体の調節は奥行手がかりとして働くといわれる。したがって、長波長の光を放つ対象ほどより近くに見えることになる。

飯田・元木・大山（1976）は、水晶体の調節が刺激の波長に応じて変

表２－１３　より近いと判断された回数

対象面の色相の組合せ					
赤－緑		緑－青		青－赤	
15	15	7	23	15	15

化することを示した。彼らは、暗黒中の被験者から57.3cmの距離に直径2°の円形の透過光刺激を提示した。刺激内部は明暗の縦縞で明部は青（波長465nm）、緑（518nm）、黄（574nm）、赤（630nm）のいずれかであった。被験者は単眼または両眼で刺激を凝視し、その状態での眼球の屈折力が測定された。その結果、刺激の波長が長いほど眼の屈折力が増すこと、すなわちより近くに眼の焦点が合っていることが示された。

7－4　見えの大きさ説

第二に、色相の違いによる見えの大きさの差違（この現象は膨張色・収縮色、expansive and contractive colors と呼ばれることがある）を距離感の差違の原因とする説がある。既に述べたように、対象の大きさは距離知覚に影響するので、この説明は可能である。

対象の色相と見えの大きさとの関係については、Over(1962)が先に述べた装置と刺激を用いて調べている。彼は、標準刺激と等大と判断される比較刺激の視角を求めたが、その値が長波長の刺激ほど小さかった。すなわち、長波長の刺激ほど大きく見えることが示された。

長波長刺激が短波長刺激より大きく見えるという報告は他にもある。たとえば、Beven & Dukes (1953)は、昼間の屋外で建物や樹木などを背景に長方形の色紙を提示した。長方形は赤、黄、緑、青の4色（主波長は各々619、578、508、457nm。反射率は14、68、15、6%。純度は69、82、22、76%）と4種の大きさ（11×22cm、14×28cm、17×34cm、20×40cm）の組合せによる16枚で、18mから25mの間の種々の距離に同時に提示された。各長方形は各提示位置に1回ずつ提示されるように計画された。被験者の課題は手元にある14種の大きさ（9×18cm～22×44

cm）の灰色長方形の中から提示された刺激と同じ大きさと思われるものを選ぶことであった。その結果、赤や黄は青や緑より大きく判断され、赤と黄あるいは緑と青の間には差が見られなかった。このように、赤と黄の間には大きな明るさ（反射率）の差があるのに見えの大きさに差がなく、赤と緑や青とは明るさにほとんど差がないのに見えの大きさが異なることから、彼らは、見えの大きさの差違は明るさの効果ではないと主張した。また、赤や黄と青とは彩度（純度）が近いのに見えの大きさが異なり、黄と緑とは明らかに彩度が異なるのに見えの大きさに差がないことから、彩度の効果でもないとした。そして、主波長の差の小さい赤と黄または緑と青の間には見えの大きさに差がなく、主波長の差が大きい両グループ間には見えの大きさの差が見られることから、主波長あるいは色相が見えの大きさの主要な決定因である可能性が高いと結論した。

また、Oyama & Anzai (1973)は、縦92cm、横102cmの黒の衝立に開けた2個の円形の穴の背後に色紙を提示した。穴の中心間の距離は40cmであった。穴を埋めた色紙による左の円盤の大きさは視角0.5°、1°、2°、4°のいずれかで、右の円盤の大きさは変化可能であった。被験者の課題は115cmの距離から両眼で観察して右の円盤が左の円盤より大きく見えるか、小さいく見えるか、同じに見えるかを報告することであり、極限法によって左の円盤の大きさの主観的等価値が求められた。左の円盤の色を灰色（マンセル表示でN 5.0/）とし、右の円盤の色を赤（5.0R 4.0/12）、黄（2.5Y 7.8/12）、緑（5.0G 4.6/8）、青（2.5PB 4.9/8）および3種の灰色（N 7.8/、N 5.0/、N 4.0/）のいずれかとした実験1では、見えの大きさは緑＜青＜赤＜黄の順に大きくなった。また、類似の明度を持つ灰色との比較では、黄と赤は見えの大きさがより大き

く、青と緑は灰色と差がなかった。灰色については明度が高いほど見えの大きさが増した。右の円盤に2種類の赤（5.0R 5.0/12と5.0R 4.0/12）、青（2.5PB 5.0/8と2.5PB 4.0/8）、灰色（N 5.0/とN 4.0/）を用いた実験2でも、赤の見えの大きさは青より大きく、赤同士では明度の高い方が大きかった。類似の明度の灰色と比べた場合、赤の見えの大きさはより大きく、青はより小さかった。これらの結果より、明るさの効果とは別に、見えの大きさに対する色相の効果が存在すると結論された。

しかし、色相は見えの大きさにほとんど影響しないという報告もある。たとえば、Oyama & Nanri (1960) は、先に述べた刺激を用い、円盤を赤、黄、緑、青（マンセル表示で各々、4.0R 3.7/12.0、7.5Y 8.5/12.0、6.0G 5.2/9.0、2.5PB 4.0/10.0）および3種の灰色（マンセルバリューは1.7、5.4、9.4）とした。その結果、見えの大きさは黄の場合に最大で、他の3色相間には差がなかった。しかし、明度が近い灰色との比較では（黄とバリュー8.4の灰色、緑と5.5の灰色、赤および青と3.7の灰色）見えの大きさに差がなく、色相の効果と見えるものは実は明度の効果であると結論された。

このように色相と見えの大きさとの関係がはっきりしない以上、見えの大きさ説が成り立ちうるかどうかは断定できない。

7－5　図－地知覚説

図と地の分化は視野内の隣接領域が有彩色であっても生じる。したがって、明るさの効果について提案した図－地知覚説を色相の効果に適用することは可能である。たとえば、隣接領域の一方が黒で他方が赤または青である場合に、領域間の見えの奥行が青より赤の方が大きければ、

黒背景における赤対象の進出が予測される。また、差がなければ、対象の色相は見えの距離に影響しないことが予測される。隣接領域間の見えの奥行と色相との関係については、両眼視における色相の効果について述べた後に改めて検討する。

第8節　両眼視の場合の色相の効果

8－1　諸研究

単眼視と異なり、両眼視の場合には対象の色相が距離知覚に影響することが多くの研究者によって確認されている。ただ、その影響の現れ方は背景の明るさや対象自体の明るさによって変化することも報告されている。まず、それらの研究を概観してみよう。

8－1－1　黒色背景を用いた研究

先に述べたように、Einthoven (1885)は、黒い背景上に赤と青の文字を提示したが、2名の被験者では赤が進出して見え、その見えの奥行は赤の文字を青の文字より4～11cm後ろに下げることによって相殺された。しかし、もう1名の被験者では青が進出して見え、相殺量は平均0.5cmであった。

Grünberg (1906)は、長方形の透過光刺激を左右に並べて提示した。色の組合せは赤と黄、赤と緑、黄と緑、黄と青であった。光源と透過面との距離を変えることによって刺激の明るさのレベルを連続的に変化させた。その結果、両刺激が等距離に見える明るさレベルがあり、それよ

り高いレベルでは長波長の刺激が進出し、低いレベルでは短波長の刺激が進出することが示された。

Luckiesh (1918)も、先に述べた装置で、青いEの位置を被験者から2.5、4、5、6、7.5mのいずれかの距離に固定し、赤いXを前後に動かして両刺激が等距離に見える位置を求めた。その結果、9名の被験者中7名において赤いXの位置が青いEの後方に、1名では前方になった。すなわち、前者7名では赤が進出し、後者1名では青が進出した。また、どの被験者でも両文字間の位置のずれは青いEの提示距離が増すほど増加した。他の1名はEの提示距離によって進出後退関係が変化した。また、微小人工瞳孔を通して観察した場合、人工瞳孔間の間隔を狭めると青が進出して見え、広げると赤が進出して見えた。自然瞳孔では赤が進出して見えた被験者でも、人工瞳孔間隔を狭めると青が進出して見えた。

大山・量（1934）が先に述べた装置で異なる色を組合せたところ、赤＞黄＞緑＞青の順で進出した。見えの奥行を相殺するのに必要な物理的奥行は、刺激間の波長差が大きいほど大きく、観察距離にほぼ比例して増加した。また、刺激の輝度を下げていくと、見えの奥行が減少し、条件によっては短波長刺激の方が進出した。

安井（1956）は、4.8×8.2cmの黒い紙の背景上に一辺5mmの色紙の正方形を二つ左右に2cm離して提示した。正方形の色は赤、黄、緑、青のいずれかであった。被験者は、3mの距離から観察し、どちらの正方形が近く見えるか、あるいは等距離に見えるかを報告した。60名の被験者から得られた、より近く見えるという判断の頻度は、黄＞赤＞緑＞青の順に多かった。ただし、この全般的順位と全く逆の判断を示した被験者も2名いた。

Kishto (1965)は、黒い背景の前方に一辺1°の正方形の色票を0.25°

の間隔で水平に並べて提示した。対象、背景、その周囲は自然光や白熱電球で照明された。対象間の前後関係を判断させたところ、ほぼ波長の順に進出し、対象間の見えの奥行は観察距離が増すほど著しかった。ただし、照明レベルあるいは眼の順応レベルによって進出する色が異なり、被験者のうちの17名については高照明レベルで赤が進出、低照明レベルでは青が進出した。進出後退関係の逆転が起きる照明レベルは被験者によって異なった。しかし、照明レベルに関わりなく一貫して赤が進出した者も2名、青が進出した者も1名いた。また、赤と青の水平の帯を縦に隣接させて末端の位置が一致するように並べたものを単眼で見ると、2種類の帯の位置が左右にずれて見え、ずれの方向は左右の眼で、また高照明レベルと低照明レベルとで逆であった。たとえば、低照明下の左眼観察では青が赤より右にずれて見えた。赤と青の正方形を直径1.65mmの人工瞳孔を通して観察しながら、一方の正方形を前後に動かして両者が等距離に見えるように位置を調整した場合、人工瞳孔間隔が64mm以上の場合は赤が進出し、64mm以下では青が進出した。そして、見えの奥行を相殺するのに必要な物理的間隔は人工瞳孔間隔にほぼ比例した。

Ishak, Said, & Abd-Elsalam (1969)は、黒い背景に対して2個の発光刺激（ともに直径20′の円盤）を左右に5°離して提示した。刺激の色は赤と青で、輝度は等しかった。左側の刺激は観察者から2mの位置に固定され、右側の刺激はその前後の種々の距離に置かれた。被験者は左の刺激に比べて右の刺激が近く見えるか遠く見えるかを報告し、恒常法によって左の刺激の主観的等価値が求められた。その結果、10名の被験者全員において赤が進出した。

高崎・加藤（1974）は、先に述べた装置を用い、左右の長方形を赤（色度座標はx=0.558、y=0.276、Y=35.3）、中央を青（x=0.181、y=0.

213、Y=23.5）にした。その結果、赤が進出して見え、それを相殺するのに必要な対象間の物理的奥行は観察距離の二乗に比例して増加した。また、刺激面の照度が100lxから60lxに低下すると赤の進出量が減少し、人工照明を用いて3.6lxまで下げると進出量がさらに減少するばかりでなく、場合によっては青が進出した。

Owens & Leibowitz (1975)は、幅2.5′高さ12.5′の発光刺激を二つ左右に3.6°離して提示した。刺激の色は赤（主波長632.7nm）と青（470nm）で、輝度はともに74.3mLであった。被験者は、2.5mの距離から人工瞳孔（直径1mmまたは2mm）を通して観察し、両刺激が等距離に見えるように、一方の刺激の位置を前後に調整した。被験者の瞳孔はneosynephrineで散大させられ、人工瞳孔の位置が左右の眼で対称になるように変えられた。その結果、左右の眼の人工瞳孔の間隔が狭いと青が進出し、広いと赤が進出した。また、見えの奥行を相殺するのに必要な刺激間の物理的奥行は人工瞳孔間距離に比例した。

増田・元木（1976）は、暗室中に2個の円形の透過光刺激（直径1.7°）を0.5°または1°離して左右に提示した。刺激の色は赤（主波長617nm、輝度19.2nt）と緑（538nm、21.2nt）であった。観察者は172cmの距離から直径1mmの人工瞳孔を通して観察した。左右各眼の人工瞳孔は、各被験者の瞳孔中心間距離を基準として、その鼻側あるいはこめかみ側へ1mmまたは2mmずらした位置に置かれた。二色型第二色覚異常者1名を含む3名の被験者全員において、人工瞳孔位置が鼻側の条件では緑が進出し、こめかみ側の条件では赤が進出した。また、cmやmmの単位で見積もられた進出の程度は、人工瞳孔位置のずれが大きいほど大きかった。

8－1－2　白色背景を用いた研究

Verhoeff (1928)は、赤と青の文字が黒い紙に印刷されている場合には赤が進出して見えるが、白い紙に印刷されている場合には青が進出して見えるという日常場面での観察を報告している。また、安井（1956）は、先の装置を用いて白色背景の条件も実施した。その結果、より近いという判断頻度の順位は、黒背景とは逆で、青＞緑＞赤＞黄となった。ただし、この場合も2名の被験者は全く逆の判断を示した。一方、Hartridge (1950)は、青緑＞青＞赤＞黄と、やや異なる進出順序を報告した。また、高崎・加藤（1974）も白色背景での測定を行ったが、この場合は青が進出し、相殺に必要な物理的奥行はやはり観察距離の二乗に比例した。Thompson & Stone (1993)も白または黒の背景上に赤と青の長方形を左右に並べて提示したが、黒背景では250名の被験者の92%が赤の進出を報告したのに対して、白背景では37%であった。

Denlger & Nitschke (1993)は、コンピュータ・ディスプレイ上にオレンジと青の垂直線分を交互に横に並べて提示した。黒背景（空白画面）の場合両色とも輝度は3.92cd/m²であり、白色背景（5.54cd/m²）の場合はオレンジが2.77cd/m²、青が3.17cd/m²であった。線分は幅1.4mm高さ54mmで、各色7本の計14本が2.8mm間隔で並べられた。28名の被験者が、約1mの距離から観察し、どちらの色の線分がより近く見えるか、あるいは等距離に見えるかを報告した。その結果、黒背景では、一貫してオレンジが進出した被験者が8名、青が進出した被験者が2名であった。白背景では各々2名と10名であった。

8－1－3　諸研究のまとめ

上記諸研究の結果は次のようにまとめることができる。

（1）物理的等距離に提示された場合、一般に、黒色背景では刺激の波長が長いほどより近く見える。すなわち、より進出する。一方、白色背景では刺激の波長が短いほどより進出する（上記の全研究）。

（2）ただし、個人差があり、黒色背景で短波長刺激が進出し、白色背景で長波長刺激が進出する例もある（Denlger & Nitschke, 1993; Einthoven, 1885; Kishto, 1965; Luckiesh, 1918; Thompson & Stone, 1993; 安井, 1956）。

（3）黒色背景の場合、刺激全体の明るさレベルあるいは眼の順応レベルが高いと長波長刺激が進出するが、明るさレベルが低いとその見えの奥行が減少したり、短波長刺激が進出したりする（Grünberg, 1906; Kishto, 1965; 大山・暈, 1934; 高崎・加藤, 1974）。

（4）波長の異なる刺激間の見えの距離差（奥行）は両者の物理的奥行によって相殺できる（Einthoven, 1885; Ishak et al., 1969; Kishto, 1965; Luckiesh, 1918; Owens & Leibowitz, 1975; 大山・暈, 1934; 高崎・加藤, 1974）。

（5）黒色背景の場合、波長の異なる刺激間の見えの奥行は両者の波長差が大きいほど大きい（大山・暈, 1934）。

（6）波長の異なる刺激間の見えの奥行は観察距離が長いほど大きい（Kishto, 1965; Luckiesh, 1918; 大山・暈, 1934; 高崎・加藤, 1974）。

（7）黒色背景の場合、微小人工瞳孔を用いると、両眼の人工瞳孔間の間隔が広いと長波長刺激が進出し、間隔が狭いと短波長刺激が進出する（Kishto, 1965; Luckiesh, 1918; 増田・元木, 1976; Owens & Leibowitz, 1975）。

（8）黒色背景の場合、波長の異なる刺激間の見えの奥行は人工瞳孔間距離にほぼ比例する（Kishto, 1965; 増田・元木, 1976; Owens & Leibowitz, 1975）。

（9）黒色背景の場合、上記の人工瞳孔を用いた場合の見え方は、自然瞳孔観察の際の傾向や被験者の色覚に関わりなく一定である（Luckiesh, 1918; 増田・元木, 1976）。

第9節　色収差説

両眼視の際の色相の効果は、多くの研究者によって、眼球内の色収差および視軸と瞳孔中心との位置ずれによって生じる、波長の異なる刺激間の網膜像差に基づく両眼立体視として説明されてきた（たとえば、Einthoven, 1885; Vos, 1960, 1963, 1966）。以下、これを色収差説と呼ぶことにする。

9－1　Einthoven (1885)の色収差説

我々の眼の視軸（凝視対象と眼の節点と網膜の中心窩とを結ぶ方向を示す）は、通常、中心よりも鼻側へずれた位置で瞳孔を横切っている。したがって、黒い背景上に色（波長）の異なる二つの対象が観察者から等距離に提示される場合、瞳孔中心を通る光の像は、眼球内の色収差のために、長波長光の像の位置が網膜上のこめかみ側へずれることになる（図2－19を参照）。また、瞳孔全体を通る光を考えた場合、波長の異なる光に対して同時に眼を調節することはできないので、どちらか一方がぼけた像になる。しかし、ぼけて広がった像の中心位置とピントの

合った像の位置とを比べると、長波長光の像ほど側頭側へ偏るという関係が成立する（図２－２０を参照）。両眼視の場合には、この像の位置ずれが両眼網膜像差となり、長波長光対象ほどより近くに見えることになる（図２－２１を参照）。すなわち、８－１－３のまとめ（１）や（５）が予測される。

このような像の位置ずれが生じることは次のようにして確かめることができる（Verhoeff, 1928）。黒地の上に赤と青の垂直線分を一直線になるように描き、ごく小さな穴を通して単眼で見る。その状態で穴の位置を左右に動かすと2本の線が横にずれて見え、そのずれの方向は色収差から予測されるものと一致する（図２－２２を参照）。すなわち、穴を視軸より鼻側へ寄せれば赤が青よりこめかみ側へずれて見え、こめかみ側へ寄せれば赤は鼻側へずれて見える。Einthoven (1885)によると、Brücke が1884年に、この現象が裸眼でも生じることを報告しているという。また、先に述べたように、Kishto (1965)は、別の刺激パタンを用いて、単眼視の際に異色対象間に横方向の見えの位置ずれが生じることを確かめた。

小さな穴を通して見る際の像の位置ずれが上記のようなものであるならば、両眼で対称の位置に置かれた微小人工瞳孔を通して両眼視する場合、人工瞳孔の位置がともに視軸より鼻側にあれば（人工瞳孔間間隔が狭ければ）青が進出し、こめかみ側にあれば（人工瞳孔間隔が広ければ）赤が進出することになる。すなわち、まとめ（７）が予測される。また、色収差は光学レンズの周辺ほど大きいので、人工瞳孔の位置が、鼻側であれこめかみ側であれ、視軸から離れるほど像の位置ずれは大きくなり、それにともなって両眼視で知覚される奥行は増すことになる。すなわち、まとめ（８）が説明できる。さらに、この推論は光の屈折という物理的性質のみに基づいているので、当然、全ての人間に当てはまるはずである。すなわち、まとめ（９）も説明できる。

背景が白い場合に関しては、白色光を補色関係にある光の混合したものと考え、背景の網膜像は対象光とその補色光との混合光によって描かれたものとみなすことができる（Hartridge, 1950; Verhoeff, 1928）。さらに、対象光は網膜像全体に均一に存在し、対象の像はその中の補色光が欠けた部分と見なされる。対象光は一様に分布するので、対象の像の位置を決めるのは補色光ということになる。波長の長短関係は対象光と補色光では逆になるから、対象間の像の位置ずれは黒背景の場合と逆になる（図２－２３を参照）。これもまた、人工瞳孔を通して単眼で観察することによって確認できる（Verhoeff, 1928）。したがって、黒背景の場合とは逆に短波長光対象が進出することになるのである。すなわち、まとめ（１）の白色背景に関する部分が説明できる。

正確には白色光は対象光の補色光以外の様々な波長の光を含む。Dengler & Nitschke (1993)は、この点を考慮した次のような仮説を提案した。背景が白色の場合、色収差により背景を構成する種々の波長光ごとに網膜の異なった位置に背景の像ができる。このため、刺激全体の像は、（１）全ての背景光が重なった部分（白色）、（２）背景光の一部が重なった部分、（３）対象光のみの部分、（４）対象光と背景光の一部が重なった部分から構成されることになる。（４）には対象光が相対的の弱って白色に近くなる部分ができる。また、背景光には対象光と同じ波長の光も含まれているので、（２）には対象光の像と類似した部分ができる。したがって、対象の像の位置を（２）の方向にずらす効果が生じることになる。しかも、（２）の部分は、対象が赤や黄の場合は対象光の像の鼻側にでき、緑や青ではこめかみ側にできる。また、（２）

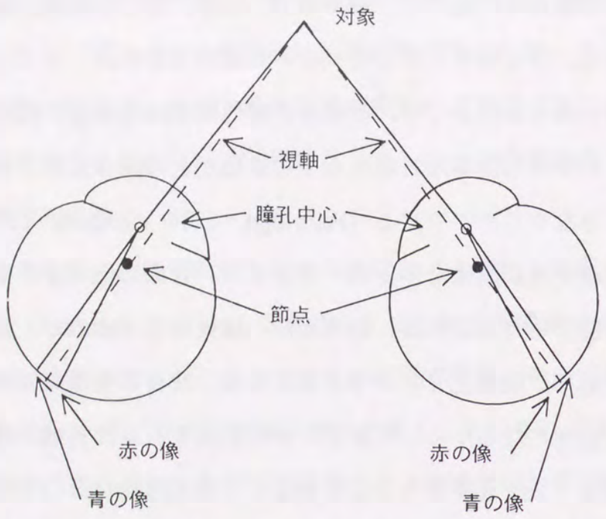


図２－１９　観察者から等距離にある赤および青対象の網膜像間の位置ずれ。視軸が瞳孔中心より鼻側にある場合の、瞳孔中心を通る光線による像の位置を示してある。

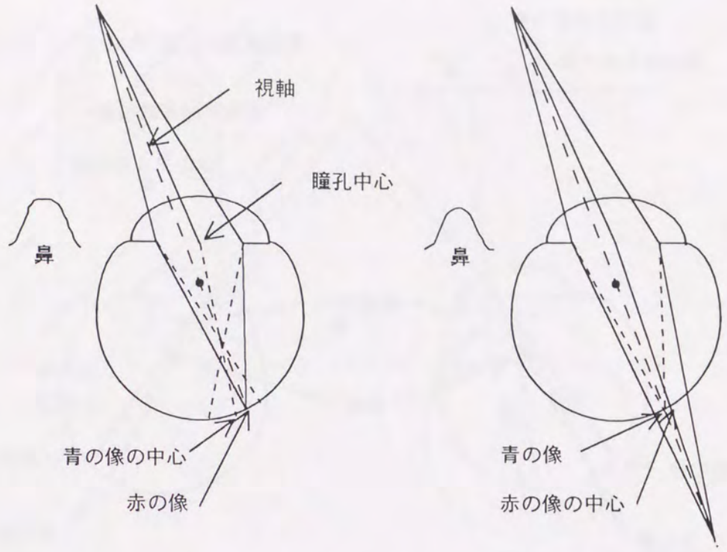


図２－２０　赤または青の光に眼の調節がなされた場合の右眼における網膜像のでき方。図の左は赤の光に、右は青の光に調節がなされた場合を示す。いずれの場合も他方の光がぼけた像を結ぶが、その中心を取り上げれば、赤の像が青の像のこめかみ側に位置する。

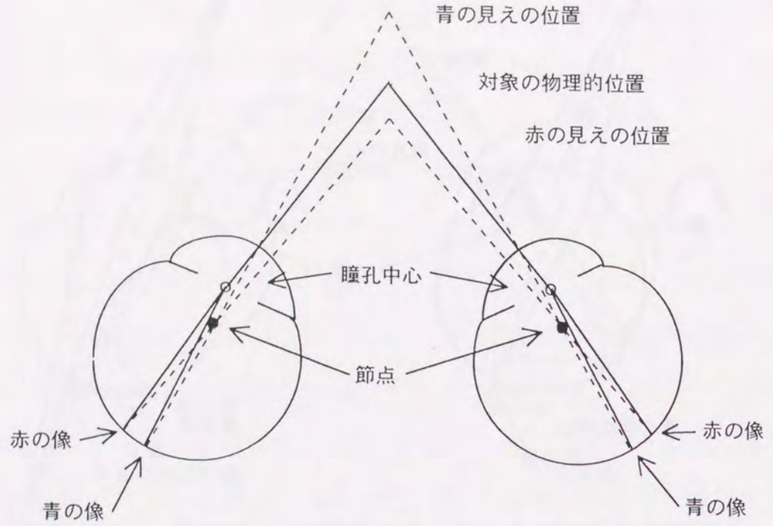


図２－２１　色収差によって両眼網膜像差が生じる場合の対象間の見えの奥行。視軸が瞳孔中心より鼻側にあり、瞳孔中心を通る光線の像が網膜像差を決定する場合を示してある。

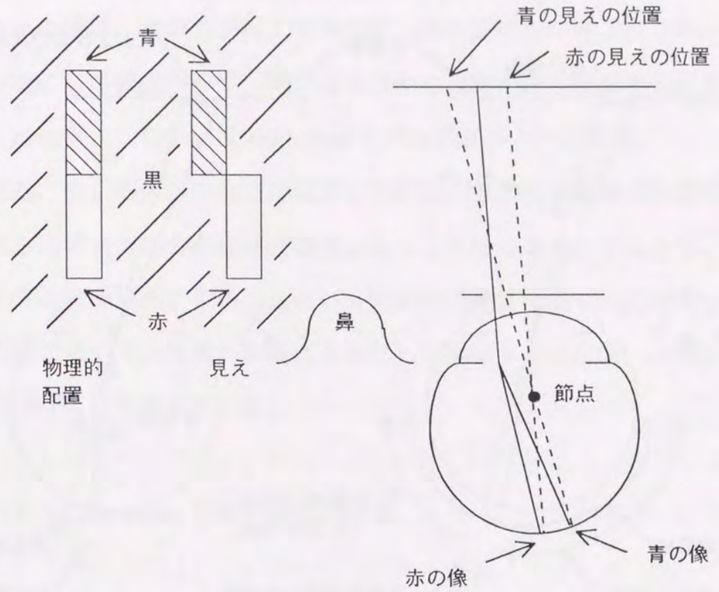


図２－２２　右眼単眼視の場合に色収差によって生じる対象間の見えの位置ずれ

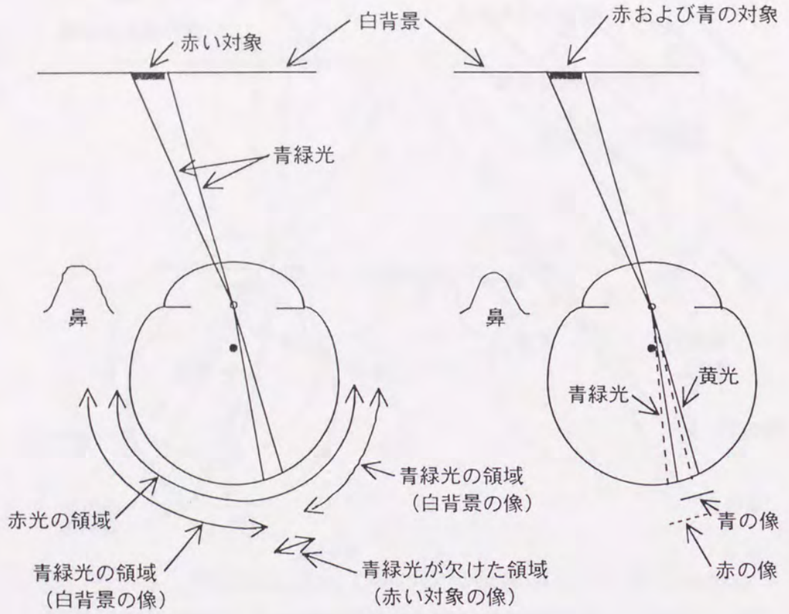


図２－２３　背景が白色の場合の網膜像のでき方

と（１）の境目が最も明瞭になる位置、すなわち対象の像の末端とみなされる位置は、黄の方が赤より鼻側に、また緑の方が青よりこめかみ側になる。この仮説からは、緑が最も進出し、黄が最も後退することが予測されるが、この予測はHartridge（1950）の報告と一致する。

また、生じるのが両眼網膜像差であれば、当然、対象間の物理的奥行が生み出す逆方向の両眼網膜像差によって相殺できる。すなわち、まとめの（４）が説明できる。さらに、両眼網膜像差に基づいて知覚される奥行は対象までの知覚的距離にともなって増加する（東山，1994）から、まとめ（６）も説明できる。

９－２　Einthoven（1885）説の問題点

しかし、上記の色収差説ではうまく説明できない事実もある。第一に、前記のまとめ（２）、すなわち自然瞳孔視の場合には同じ明るさレベルでも刺激波長間の進出順序に個人差がみられるという事実がある。Einthoven（1885）やLuckiesh（1918）は、進出後退現象の個人差を瞳孔の位置など、眼球の構造の個人差に帰着させた。しかし、彼らは、そのような個人差を実際に確認したわけではない。

第二は、まとめ（３）、すなわち黒色背景で刺激全体の明るさレベルが高い場合には確かに長波長刺激が進出するが、明るさレベルが低いと青が進出する場合があるという事実である。色収差は光の強度に関係がないので、Einthoven（1885）の色収差説からは、波長間の進出後退関係は明るさレベルに関わりなく一定であることが予測される。Kishto（1965）は、明るさレベルの低下にともない瞳孔が鼻側に偏って散大する（瞳孔中心と視軸との位置関係の変化をもたらす）可能性を指摘したが、そ

のような瞳孔の非対称的な散大は確認できなかった。

9－3　Vos (1960)の色収差説

これらの問題点を解消する上で最も有力なのは、Vos(1960, 1963, 1966)によって提唱された、スタイルズ・クロフォード効果（Stiles-Crawford effect）を加味する修正説（以降、色収差説の語はこの説を指す）である。スタイルズ・クロフォード効果とは、物理的強度の等しい光でも瞳孔に入射する位置によって感じられる明るさが異なり、入射位置が瞳孔の周辺部になるほど暗く見える現象である。

彼は、まず、スタイルズ・クロフォード効果を考慮に入れずに、幾何光学の法則と眼球の光学的特性に基づいて、微小人工瞳孔を通して単色光刺激を観察する際に色収差によって生じる両眼網膜像差（正確には、それを相殺するのに必要な対象間の物理的奥行量）を予測する次の式を考案した。

$$\Delta v = [2v^2 \Delta n / fp(n-1)]\ (x_v - x)$$

Δv：等距離に見える場合の対象間の物理的奥行量

v：観察距離、n：眼球全体の平均屈折率

Δn：刺激光間の屈折率差

f：眼球の主点と網膜間の平均距離

p：瞳孔中心間の距離

x：瞳孔中心と人工瞳孔位置との距離

x_v：瞳孔中心と視軸が瞳孔を横切る位置との距離

x と x_v は瞳孔中心の鼻側で正、側頭側で負

そして、式に基づく予測値が実測値とよく一致することを確認した。

彼は明るさの等しい縦長の線分状の光源刺激2本を暗室で提示した。一方の刺激は色が赤（主波長650nm）で観察者から80cm の距離に固定され、他方の青（主波長450nm）の刺激は前後に移動可能であった。被験者は人工瞳孔を通して観察し、両刺激が等距離に見えるように青の位置を調整した。上記の式からは、異色対象間の見えの奥行を相殺するのに必要な対象間の物理的奥行量が、自然瞳孔中心と人工瞳孔との距離（人工瞳孔間距離と言い換えることもできる）と直線関係をなすことが予測されるが、結果はその通りになった。この結果は前述のまとめ（8）とも一致する。さらに、上記の式のパラメーターに既知の値を代入して求められる直線の傾きの予測値は実測値とほぼ一致した。また、式からは相殺量が観察距離の二乗に比例して増大することも予測されるが、この予測は高崎・加藤（1974）の結果と一致する。

次に、彼は、自然視の場合のΔvは、上記の式のΔvを瞳孔全体にわたる x に関して平均したもの（Δv_{av}）になり、瞳孔はその中心に関して対称である（すなわち、x の平均値 x_{av} はゼロ）と仮定して、次式を立てた。

$$\Delta v_{av} = [2v^2 \Delta n / fp(n-1)]\ (x_v - x_{av})$$

$$\Delta v_{av} = [2v^2 \Delta n / fp(n-1)]\ x_v$$

この仮定は、言い換えると、瞳孔中心を通る光線の作る像が両眼網膜像差を決定するということである。しかし、この仮定に基づく対象間の見えの奥行に関する予測値は実測値と一致しなかった。x_v の実測値からは4名の被験者の全員について青の進出が予測されたが、2名はおいては逆の結果となった。また、進出色の予測が的中した被験者でも、相殺量に関しては予測値と実測値のずれが大きかった。

そこで、Vos は、進出後退現象の個人差をより正確に予測するために、

スタイルズ・クロフォード効果を考慮に入れた式の修正を試みた。Δvをxに関して単純に平均するのではなく、物理的強度の等しい光が各xを通る際に生じる明るさ感覚の相対値で重みづけた平均を求めるようにした。すなわち、上記の式のx_vの替わりに、スタイルズ・クロフォード効果の重心入射位置と瞳孔中心との距離を用いた。これは、瞳孔におけるスタイルズ・クロフォード効果の重心位置を通過する光線が両眼立体視に有効な（両眼網膜像差を生じる）像の位置を決めるということを意味する。そして、スタイルズ・クロフォード効果の個人差が、瞳孔における有効位置の個人差を生じ、ひいては刺激波長間の進出後退関係の個人差を生むということになる。すなわち、瞳孔内の有効位置が視軸より鼻側にある者では短波長の刺激が進出し（図３－２４を参照）、こめかみ側にある者では長波長の刺激が進出するというわけである。そして、各被験者についてスタイルズ・クロフォード効果を実測した結果に基づく予測値は、瞳孔中心に基づく予測値より実測値に近くなった。少なくとも進出色の種類に関しては4名の被験者全員の実測値と一致した。また、彼は、スタイルズ・クロフォード効果の極大位置（等しい強度の光なら、この位置を通るとき最も明るく感じられる）を計算に用いた場合でも、重心位置を用いた場合と同程度に実測値と一致する予測値がえられると報告している。

また、刺激全体の明るさレベルによる刺激波長間の進出後退関係の差違については、瞳孔径の変化にともなって上記の有効位置が変化するためと説明した。スタイルズ・クロフォード効果の極大位置や重心位置は、通常、瞳孔中心より鼻側にずれている。明るさレベルが高くて瞳孔が収縮している場合にはスタイルズ・クロフォード効果の影響は弱く、瞳孔の中心を両眼網膜像差決定の有効位置と考えて差し支えない。そして、

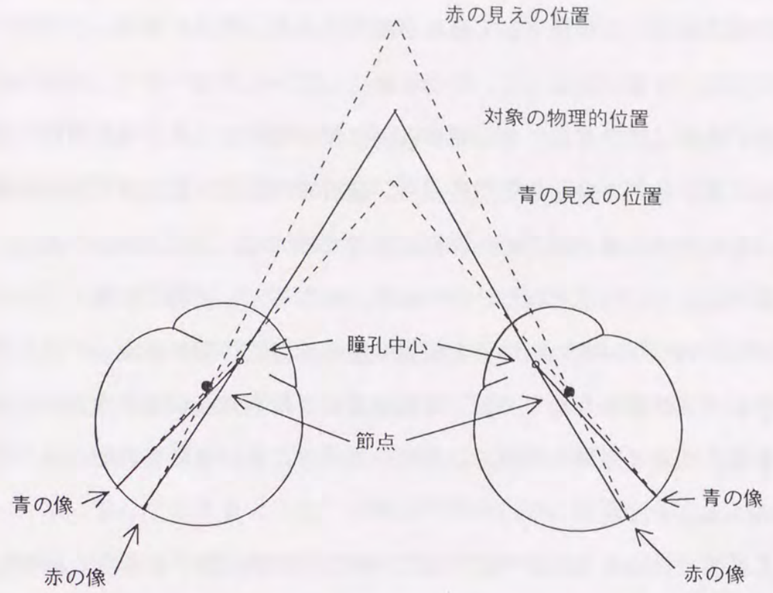


図２－２４　網膜像差決定の有効位置が視軸の鼻側にある場合の対象間の見えの奥行

視軸は一般に瞳孔中心より鼻側にあるから、長波長刺激が進出する。一方、明るさレベルが低下して瞳孔が散大すると、スタイルズ・クロフォード効果の影響が強まって、有効位置はしだいに鼻側へ移り、刺激間の見えの奥行は減少する。そして、有効位置が視軸よりもさらに鼻側へ移るならば、そこを通過する光のうち、屈折率の大きい短波長光の網膜像は、長波長光の像よりこめかみ側に位置するので、短波長刺激が進出して見えるようになるというわけである。もちろん、視軸の位置とスタイルズ・クロフォード効果の極大位置や重心位置との関係によっては、明るさレベルに関わりなく一貫して長波長または短波長刺激が進出して見える個人も考えられるわけで、事実そのような例が報告されている（Kishoto, 1965）。

ところで、Vos（1960）の予測式は単色光刺激に関するものであった。高崎（1975）は、複合光あるいは物体色の場合でも、強度分布の極大波長あるいは重心波長に同様な計算式を適用すれば、見えの奥行の相殺量をかなり正確に予測できると報告した。

第１０節　色収差説の検証

色収差説は最近に至るまで様々な角度から検証されてきた。そして、この仮説を支持するデータはますます増加しつつある。ここでは、それらの諸研究を概観する。

１０－１　人工瞳孔位置の影響

Ye, Bradley, Thibos, & Zhang (1991)は、単眼観察する場合に異色

対象間に生じる見えの左右方向の位置のずれと両眼視での見えの奥行とを実測し、両者の関係、およびそれらと人工瞳孔位置との関係を検討した。

刺激は幅15′高さ115′の黒い棒を2本縦に並べたもので、上の棒の位置は固定され、下の棒は前後左右に移動可能であった。棒の背景は250′×115′の大きさで、透過光により上の棒の背景は赤（622nm、95cd/m^2）に下の棒の背景は青（433nm、12cd/m^2）に色づけられた。被験者の瞳孔は tropicamide で7.5～8.5mm に開かれ、その内部の種々の位置に（両眼視の場合は左右の眼で視軸に関して対称になるように）0.7mm径の人工瞳孔が置かれた。被験者の課題は、単眼で観察して上下の棒が一直線に並んで見えるように下の棒の位置を左右に調整すること、および両眼で観察して等距離に見えるように下の棒の位置を前後に調整することであり、その際の上下の棒の位置のずれが測定された。観察距離は105cm であった。

物理的位置関係通りの見えが生じる人工瞳孔位置を基準に種々の人工瞳孔位置を定義した場合、基準位置よりこめかみ側では青が赤よりこめかみ側に、かつ後ろに見え、基準位置より鼻側ではその逆になった。見えの位置ずれを相殺するのに必要な物理的ずれ（両眼条件については両眼網膜像差の角度に換算した値）は、基準位置と人工瞳孔位置との距離に対してほぼ直線的に変化した。ただし、その傾きは、眼球光学系に関するモデルから予測される値よりやや大きかった。また、両眼視での見えの奥行の相殺量は、単眼視での見えの方向ずれの相殺量からの予測値とよい一致を示した。また、人工瞳孔の位置が左右の眼で対称でない場合には、見えの奥行の相殺量はそれぞれの眼における人工瞳孔位置の基準位置からの距離の和に比例した。

そして、これらの結果は全て、色収差による網膜像間の位置ずれの左右の眼での差違（両眼網膜像差）が進出後退現象の原因であるとする色収差説を支持すると結論された。さらに、同じ眼のモデルを用いた予測値が、Vos（1960）やOwens & Leibowitz（1975）の測定値とかなりよく一致することも指摘した。

１０－２　明るさレベルあるいは瞳孔径の影響

刺激全体の明るさレベルの変化は、瞳孔径の変化を引き起こすだけでなく、眼の順応状態をも変化させる。そして、低レベルの明るさに順応すると青系統の色が赤系統の色より明るく見えるようになること（プルキンエ現象、Purkinje phenomenon）が知られている。したがって、明るさレベルの低下にともなう短波長刺激の進出は、色収差説が主張するようなスタイルズ・クロフォード効果の関与によるものではなく、この見えの明るさの差違が原因である可能性がある。

そこで、Sundet（1972）は、刺激の明るさを一定に保ち、薬品で瞳孔径を変化させた場合にも波長間の進出後退関係が変化することを確かめ、Vos（1960, 1963, 1966）の色収差説の妥当性を示した。彼は、暗黒中に2個の透過光刺激を左右に0.2°離して提示した。刺激は赤（主波長650nm）と緑（主波長530nm）の長方形（縦1.4°横0.3°）で、輝度は5 cd/m^{2}であった。被験者の瞳孔はmetaoxedrineで約8mm径に散大させられ、またpilocarpine hydrochlorideで約2mm径に縮小させられた。被験者は100cmの距離から観察し、両長方形が等距離に見えるように赤の長方形の位置を前後に調整した。3名の被験者の全員において、瞳孔径が小さい条件では赤が進出し、瞳孔径が大きい条件では後退した。彼は、

この結果から、刺激の明るさレベルにともなう波長間の進出後退関係の変化の原因は、眼の順応状態の変化ではなく、瞳孔径の変化であると結論した。

さらに、Sundet（1976）は、人工瞳孔を使用する実験を行い、Vos（1960, 1963, 1966）の説をさらに検証した。彼は、被験者の瞳孔をmetaoxedrine hydrochlorideで散大させ、人工瞳孔の中心位置を被験者の瞳孔の中心に一致させた。人工瞳孔の直径は2、3、4、5、6mmのいずれかであった。2名の被験者の結果は、相殺量が瞳孔径にともなってほぼ直線的に変化し、瞳孔径4mm付近でプラス・マイナスが逆転することを示した。すなわち、瞳孔径が2、3mmの場合は赤が進出し、5、6mmでは青が進出した。そして、この結果から、明るさレベルの変化にともなう進出色の変化の原因を瞳孔の非対称的散大に求めるKishto（1965）の仮説を否定し、Vos（1960, 1963, 1966）の色収差説を支持した。

Ye, Zhang, Bradley, & Thibos（1989）も、人工瞳孔の中心位置を自然瞳孔の中心に固定して人工瞳孔径の効果を調べた。人工瞳孔が直径1mm程度と小さい場合、実測された単眼視での対象間の見えの左右の位置ずれや両眼視での見えの奥行量は、眼球光学系のモデルと両眼網膜像差決定の有効位置を瞳孔中心と仮定することから予測される値と一致した。しかし、人工瞳孔が大きい（2～7mm）場合には予測値は実測値と一致しなかった。そして、人工瞳孔径が2～5mmの場合にはスタイルズ・クロフォード効果の重心位置を有効位置として計算することによって、5～7mmの場合には極大位置を用いることによって最も当てはまりのよい予測値の得られることが示された。

Ye, Bradley, Thibos, & Zhang（1992）は、瞳孔径の効果を異なる刺激の明るさレベルの下で調べ、スタイルズ・クロフォード効果の関与を

さらに検討した。方法はYe et al. (1991)とほぼ同じであった。人工瞳孔径は0.7、3、5mm、その位置は前述の基準位置、基準位置の鼻側およびこめかみ側2mmの3ヶ所であった。単眼視での見えの方向ずれに対する人工瞳孔位置の効果については、Ye et al. (1991)と同じ結果が得られた。また、ずれの量は瞳孔径の拡大にともなって減少した。両眼視での見えの奥行量も瞳孔径が大きいほど少なく、その相殺量は単眼像の見えの方向のずれから計算される両眼網膜像差とほぼ完全に一致した。

また、上の棒の背景を黄（589nm）にし、上下の背景の見えの明るさを同等に保ちながら、その明るさレベルを明所視から暗所視に至る7段階に変化させる条件も実施された。瞳孔径が1mmの場合には見えの奥行量は明るさレベルに関わりなくほぼ一定であった。瞳孔径が5mmの場合、明るさレベルが高いと見えの奥行量は瞳孔径1mmの場合より少なかったが、明るさレベルの低下にともなって増加し、瞳孔径1mmの場合と大差はなくなった。

そして、瞳孔径の拡大にともなう見えの奥行量の減少は、スタイルズ・クロフォード効果の極大位置が視軸の近辺にあるという知見から説明された。すなわち、瞳孔が散大して、瞳孔中心ではなく、それよりも視軸に近いスタイルズ・クロフォード効果の極大位置が両眼網膜像差決定の有効位置となれば、それだけ見えの奥行量は減る（視軸と完全に一致していれば見えの奥行は消失する）というわけである。また、暗所視レベルでは瞳孔径による見えの奥行量の差が少ないという結果は、暗所視レベルではスタイルズ・クロフォード効果がほとんど消失するという知見から説明された。すなわち、スタイルズ・クロフォード効果がなければ有効位置は常に瞳孔中心であり、したがって瞳孔径によって両眼網膜像差が変化することはないというわけである。そして、従来知られいる

明るさのレベルあるいは瞳孔径の進出後退現象への影響は、色収差説で十分説明できると結論された。

一方、Simonet & Campbell (1990)は、色収差説と一致しない結果を報告した。彼らは、黒い背景に対して幅1.8′高さ3.1°の線分状の透過光刺激2本を4.6′の間隔で上下に並べて提示した。上の線分は赤（主波長は656nm）、下の線分は青（486nm、50cd/m²または220cd/m²）で、赤の輝度は両刺激が同じ明るさに見えるように被験者ごとに調整された。被験者は、まず単眼で観察して青線分が赤線分のどちら側にずれて見えるか、あるいは同一直線上に見えるかを報告し、次ぎに両眼で観察して青線分が赤線分より近くに見えるか、遠くに見えるか、等距離に見えるかを報告した。被験者の顔面は赤い光で照明され（角膜の位置で照度が10または1000lx）、瞳孔径がビデオに記録された。

その結果、30名の被験者のうち、顔面の低照明条件では、赤が進出した者が13名、青が進出した者が13名、等距離に見えた者が4名であった。高照明条件では、それぞれ14名、9名、7名であった。しかし、両眼視で見えの奥行を報告した被験者のうち、単眼視で見えの方向のずれを報告した者は9名にすぎず、単眼視でのずれの方向と両眼視での進出色とが一致しない者も4名いた。また、単眼視で見えの方向ずれを生じながら両眼視では見えの奥行が生じなかった被験者も2名いた。瞳孔径については、進出色の異なる被験者群間に差がなかった。また、照明条件間で進出色が逆になった被験者群と変化がなかった被験者群との間に、照明条件による瞳孔径の変化量に差がなかった。このように、単眼視での見えと両眼視での見えが対応せず、進出色やその変化が瞳孔径やその変化と対応しないことから、色収差説に疑問が呈された。

しかし、Simonet & Campbell (1990)の報告に対しては批判もある。

Ye et al. (1991, 1992)は、単眼視と両眼視で瞳孔位置や瞳孔径が異なる可能性、瞳孔径の変化にともなって瞳孔位置が変化する可能性、自然瞳孔の中心と視軸のずれが小さいため、単眼での見えの位置ずれも両眼での見えの奥行も量が少なく、測定誤差の影響が大きかった可能性を指摘している。

１０－３　白色背景での進出後退現象

Winn, Bradley, Strang, McGraw, & Thibos (1995)は、白色背景の場合には両眼網膜像差が対象光の補色光によって決定されるという仮説を、背景光の構成を単純化した事態で検討した。

コンピュータ・ディスプレイ上に縦60mm 横20mm の長方形を二つ上下並べて提示した。色はディスプレイの単一蛍光体の発色による赤（色度座標は x=0.626、y=0.323）と青（x=0.152、y=0.067）あるいは赤と緑（x=0.284、y=0.600）の組合せであり、赤の長方形が常に上であった。刺激光は単色光ではないので、構成光の波長ごとに物理的強度と眼の分光感度とから相対的な明るさを計算し、それに基づいて刺激光の重心波長（赤は605nm、緑は544nm、青は497nm）が決められた。背景は黒（画面空白）、赤紫（x=0.298、y=0.152）、黄（x=0.443、y=0.482）のいずれかであった。有彩色背景は対象光を重ねて作られ、赤紫背景は対象が赤と青の場合にのみ、黄背景は赤と緑の場合にのみ用いられた。被験者の瞳孔は tropicamide HCl で散大させられ、1.78mm 径の人工瞳孔が前述の基準位置、基準位置から鼻側またはこめかみ側へ1、2、3 mm の位置のいずれかに置かれた。観察距離は6.85m であった。そして、Ye et al. (1991, 1992)と類似の測定がなされた。ただし、両眼視の場合は、左眼に画面を直接提示し、右眼にプリズムを通した左右反転像を提示することによって立体視を生じさせた。黒背景の場合、単眼視での見えの方向ずれと人工瞳孔位置との関係は、Ye et al. (1991, 1992)と同じであった。

その結果、刺激の重心波長と眼球光学系のモデルからの予測は、見えのずれの量と人工瞳孔位置との直線関係の傾きによく近似した。また、有彩色背景の場合、ずれの量は黒背景の場合とほとんど同じで、ずれの方向が逆であった。両眼視の場合も、見えの奥行は、黒背景と有彩色背景とで方向が逆で量がほぼ等しかった。黒背景では赤が進出し、有彩色背景では緑または青が進出した。また、見えの奥行は、方向、量とも、単眼での見えの方向ずれから予測されるものとよく一致した。さらに、画面を上下に分け、上半分に黒背景と青または緑の長方形、下半分に赤紫背景または黄背景と赤を提示し、両眼で観察した場合には、人工瞳孔の位置に関わりなく見えの奥行は生じなかった。

彼らはこれらの結果を次のように説明した。有彩色背景光は2種の対象光の混合であるので、一方の対象について考えると、その対象光は刺激の全領域に存在する。対象領域と背景領域との違いは他方の対象光の有無である。すなわち、ある対象の輪郭あるいは位置を決めているのは他方の対象の構成光である。たとえば、赤紫背景上の赤長方形の位置は青光によって決まる。それゆえ、ともに青光によって位置が決まる黒背景上の青長方形と赤紫背景上の赤長方形との間には見えの奥行が生じないのである。また、赤紫上の青長方形の位置は赤光で決まる。それゆえ、赤紫背景では赤光で位置の決まる青長方形が進出する。しかも、黒背景の場合と赤紫背景とでは、それぞれの対象の位置を決定する光の種類が入れ替わるだけであるから、見えの奥行の方向は変わっても量は変わら

ないことになる。そして、彼らは、他の研究結果も総合して、色収差説が両眼視での進出後退現象に対して広く適用可能であると結論した。

１０－４　ランダムドットパタンにおける進出後退現象

従来の研究で用いられた刺激の形態は二本の線分や二個の円盤といったものであったが、Faubert (1994, 1995)は、ランダムドットパタンにおける進出後退現象を紹介した。

彼は、コンピュータディスプレイ上に、緑または灰色の一様な背景（24×18cm）とランダムドットによる二重の正方形（内側は9cm 四方、外側は15cm 四方）を描いた。内側の正方形（9cm 四方）は背景色と黒のランダムドットパタンで埋められ、内外の正方形間の領域は背景色と赤または青のランダムドットパタンで埋めらた。このパタンを両眼で観察すると、一般に、周囲領域は背景と同じ距離に見えた。中央の正方形は周囲が赤なら前方に突出して見え、青なら周囲の背後に見え、見えの奥行量は観察距離にともなって増大した。単眼視ではそのような見えの奥行はほとんど生じなかった。また、微小人工瞳孔を通して観察した場合、見えの奥行の方向や量は人工瞳孔の位置に依存して変化し、それらは色収差説からの予測と一致した。これらから、眼球の色収差による両眼網膜像差が現象の根底にあると結論された。

しかし、中央部をランダムドットパタンではなく、背景色で塗りつぶすと、色収差による両眼網膜像差に変化はないと考えられるにもかかわらず、見えの奥行は消失した。また、個々のドットを大きくすると、見えの奥行が生じるまでの時間が増加した。彼は、これらの従来の進出後退現象とは異なる特徴について、関与しているのが全体的立体視機構であり、その性質が反映していると解釈した。それに対して、従来の進出後退現象は局所的立体視機構を根底に持つとされた。

第１１節　色収差説を否定する研究

これまで紹介しように、進出後退現象の研究は日本でも盛んになされてきたが、中には、両眼視における色相の効果の存在を否定したものや、色収差説を否定したものがある。それらを以下に検討する。

たとえば、元木・大山（1976）は、先に述べたように単色透過光面を刺激として用いたが、波長による見えの距離の差違は見出せなかった。しかし、彼らの実験では標準刺激と比較刺激が視角にして20°も離れており、これは異例の大きさである。両眼視における色相の効果を見出した研究のほとんどが5°以下の刺激間間隔を用いているし、Kishto (1965)は、多くの被験者において進出後退現象の出現に最適な間隔が0.25°～0.5°であったと述べている。また、Sundet (1978)も1.5～2°の間隔が適当としている。色収差による両眼網膜像差は微妙なものであり、この種の距離判断実験では対象間の間隔が増すほど測定値のばらつきが大きくなる（たとえば、海老原, 1973, 1974; 萩野, 1971; 萩野・西野, 1979）から、色相の効果が測定誤差の変動の中に埋没してしまった可能性がある。あるいは、3名の被験者の測定値を単純に平均したことが原因かもしれない。既に述べたように、自然視の場合、色相の効果の現れ方は個人によって異なるからである。

また、Oyama & Yamamura(1960)は、明るさの効果の項で述べた装置を用い、背景が白でも黒でも赤系統の色が進出することや、照明を非常に暗くした場合には色相の効果が現れないことを示した（図２－２５

を参照）。また、二色型第一および第二色覚の被験者の場合は、黄が最も進出し、青が最も後退、中間に赤、灰、緑が位置することを見出した。そして、これらの結果を根拠に色収差説を否定した。すなわち、色収差は光の強さや網膜受容器の性質とは関係がないから、それが原因なら、照明の高低や観察者の色覚の型に関わりなく、一定の進出後退現象が現れるはずだと言うのである。彼らの報告は、色収差説否定の根拠として、現在も入門書やハンドブックなどにしばしば引用されている（金子, 1990; 金子・富家, 1998; 大山, 1994）。

第１２節　Oyama & Yamamura(1960)の結果に対する図－地知覚説の適用可能性

しかし、既に指摘したように、彼らの刺激布置では標準刺激面と背景面とが図－地反転パタンを構成すると考えられる。したがって、彼らの結果に対しては、明るさの効果に適用した図－地知覚説が適用可能である。その可能性を検討する前に、彼らの刺激布置がきわめて特異であることを考慮し、実験１３において、Oyama & Yamamura(1960)の高照明条件の結果を、実験１４において低照明条件の結果を確認することにした。

１２－１　実験１３

方法

被験者　色覚が正常な8名の大学生であった。

装置と刺激　実験５、６と同じ装置（図２－３、４を参照）を用いた。

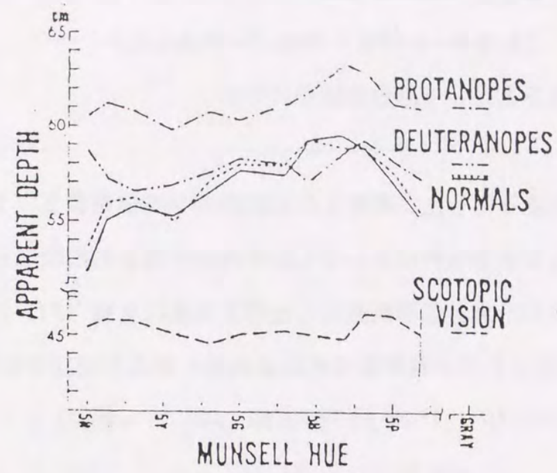


図２－２５　Oyama & Yamamura (1960)の実験Ⅱ、ⅣおよびⅤの結果

標準刺激面の色は赤（色研番号は1-15-9、マンセル表示は4.4R 5.0/11.7）または青（16-15-6、3.2PB 4.8/10.3）であった。

手続　実験５と同じであった。

結果

全被験者を込みにした、判断された距離の平均値を表２－１４に示す。白、黒どちらの背景条件においても赤の方が判断された距離が短かかった。分散分析の結果、標準刺激面の色の主効果は有意（$F(1,7)=36.16$, $p<0.01$）であったが、背景面の色の主効果と両者の交互作用は有意とはならなかった（$F(1,7)=2.22$, $p>0.10$、$F(1,7)=0.32$）。

１２－２　実験１４

方法

被験者　色覚の正常な4名の大学生であった。

装置と刺激　実験５、６、１３と同じ装置が用いられた。対象面の色は赤（1-15-9、4.4R 5.0/11.7）と青（16-15-6、3.2PB 4.8/10.3）で背景面は黒のみであった。背景面は照明せず、対象面は照度が0.03lxになるように、比較刺激背景面は照度が0.1lxになるように照明された。

手続　実験５と同じであった。ただし、上昇下降各2系列計4回の判断が行われた。

結果

全被験者を込みにした判断された距離の平均値は表２－１５に示す。青の方が判断された距離がやや短くなったが、分散分析の結果、この傾向は統計的には有意でなかった（$F(1,3)=5.21$, $p>0.10$）。

表２－１４　判断された距離（cm）

背景面	標準刺激面の色相 赤	青
白	33.4	42.6
	(44.12)	(74.89)
黒	36.6	44.7
	(97.49)	(113.95)

注）（）内の数値は標準偏差。

表２－１５　判断された距離（cm）

標準刺激面の色相	
赤	青
44.8	38.5
(106.95)	(109.03)

注）（）内の数値は標準偏差。

１２－３　実験１３、１４の結果についての考察

高照明条件（実験１３）、低照明条件（実験１４）のいずれに関しても、Oyama & Yamamura (1960)の結果が確認されたと言える。ちなみに、著者が観察したところでは、上記の低照明条件下では、青の標準刺激面が赤より明るく見えた。これはプルキニエ現象と考えられるが、判断された奥行が青において赤よりやや短くなったのは、この見えの明るさの影響と推測される。

１２－４　図になりやすさと色相との関係

一般に、図－地反転図形においては、ある領域の図になりやすさは色相によって異なる（大山，1969）。Oyama(1960)は、直径12cm の円形を六つの扇形に等分し、一つおきに三つの扇形を12種類の有彩色のいずれかに、残りを各有彩色と同じ明るさの灰色にした図形（図２－１２を参照）を提示して、被験者にαとβのどちらの形が「図」となって見えたかを報告させた。円の周囲の縦20cm 横30cm の範囲は白か黒、刺激面の照度は約3ft-c であった。被験者は、115cm の距離から両眼で30秒間観察し、α、βの見えに対応するキーを押した。そして、有彩色領域が図として知覚された時間が計測された。その結果、周囲の白黒に関わりなく有彩色部分が赤系統の色の場合は灰色領域より図になりやすく、青系統の色の場合は逆に地になりやすいことが示された。

また、山下（1928）は、観察者から1.2m の距離に立てられた衝立の二つの穴（一辺4cm の正方形）の1m 後方に色紙面を提示し、両色紙面間の前後関係を判断させる実験を行った。その際の観察者の報告による

と、色紙面の見え方は、（1）衝立の前方に浮き出して見える、（2）衝立と同一平面に見える、（3）衝立の穴を通してその背後に見える、のいずれかであった。また、色相によって見え方が異なり、赤や黄では（1）や（2）に、緑や青では（3）になりやすかった。また、観察中に見え方が変化する場合もあることが報告された。（1）の見え方では穴の領域が図となっており、（3）では地となっているとみなすならば、この報告も赤系統の色が青系統の色より図になりやすいことを示唆している。

１２－５　図－地知覚説による説明

上記のように赤系統の色が青系統の色より図になりやすいのならば、図－地知覚説からは、Oyama & Yamamura(1960)の高照明条件の刺激布置では、標準刺激面の色が赤系統の場合、標準刺激面が図となり地である背景面の前方に知覚される割合が高くなると予測される。しかも、標準刺激面が図になる場合は、地となって背景面の後方に知覚される場合より、相対的により近く見えるはずである（図２－７ｂとｃの破線矢印を比較されたい）。したがって、見えの距離に関する複数回の測定の平均値においては、地となって背景面の後方に知覚されやすい青系統の色より、図となって背景面の前方に知覚されやすい赤系統の色の方が、値が小さくなること、すなわち、赤系統の色の進出という結果が予測される。

また、図－地知覚を前提とする場合、別の説明も可能である。すなわち、標準刺激面と背景面の図－地関係は標準刺激面の色相によらず一定で、標準刺激面と背景面の間の、図－地分化に基づく知覚的奥行量が標

準刺激面の色相によって異なると仮定するのである。もし、この知覚的奥行量が青系統の色より赤系統の色において大きいならば、やはり赤系統の色の進出という予測が導かれる。

そこで、この二つの仮説のどちらが適当かを検討するために実験１５と１６が行われた。

１２－６　実験１５

Oyama & Yamamura(1960)と類似の実験５の装置を用い、標準刺激面と背景面の間の見えの奥行量が標準刺激面の色相によって異なるかどうかを検討した（江草，1977b において報告）。

方法

被験者　正常な色覚を持つ10名の大学生であった。

装置と刺激　実験５、６、１３、１４と同じ装置が用いられた。標準刺激面には明度の等しい赤と青（色研番号では1-15-9と16-15-6、マンセル表示では4.4R 5.0/11.7と3.2PB 4.8/10.3）が用いられた。

手続　実験６と同じであった。

結果と考察

全被験者のデータを込みにした、各判断カテゴリーの出現頻度を表２－１６に示す。表中の＋判断は比較刺激棒を近づけた場合、－判断は遠ざけた場合、0判断は動かさなかった場合を示す。背景面の白黒に関わりなく、赤では、標準刺激面が背景面より前と判断された割合が後ろと判断された割合より高く、青では逆であった。これらの頻度差のうち、赤の場合と黒背景の青の場合は統計的に有意であった（赤－白：$\chi^2(1)=2$

3.28, $p<0.01$。赤－黒：$\chi^2(1)=30.87$, $p<0.01$。青－黒：$\chi^2(1)=8.34$, $p<0.01$）が、白背景の青の場合は有意ではなかった（$\chi^2(1)=1.49$）。

全被験者のデータを込みにして、＋、－の判断別に判断された奥行量を平均した結果を図２－２６に示す。判断された奥行量は赤の方が青よりやや多い傾向が見られたが、逆の条件もあり、図２－１０の明るさの効果ほど明瞭ではなかった。

この結果からは第一の仮説がより適当と考えられる。しかし、わずかながら標準刺激面と背景面の間の見えの奥行は赤の方が大きい傾向も見られ、第二の仮説も完全には否定できない。

ただ、用いられた色紙は、明るさは同じであるが、赤の方が彩度が高い。したがって、見えの奥行の差は、色相の違いによるものではなく、彩度の影響という可能性もある。そこで、実験１６では、明るさだけでなく彩度も一定にして、一般的に隣接二領域間の見えの奥行が領域の色相によって異なるかどうかを検討した（Egusa, 1983において実験２として報告）。

１２－７　実験１６

方法

被験者　視力、色覚ともに正常（ただし、視力については矯正視力を含む）で、実験９の参加者を含む15名の大学生であった。

装置と刺激　装置は実験９と同じであった（図２－１６を参照）。刺激面の色として、黒（マンセルバリューが2.0以下）、灰色（色研表示で0-15-0、マンセル表示でN4.7）、白（マンセルバリューが9.0以上）、赤（1-15-6、4.0R 4.9/7.6）、緑（12-15-6、4.9G 4.6/9.0）、青（16-15

表２－１６　各判断カテゴリーの生起頻度

背景		白			黒		
判断		＋	0	－	＋	0	－
Ssの色相	赤	66	13	21	72	9	19
	青	35	19	46	33	6	61

注）Ssは標準刺激面を表す。

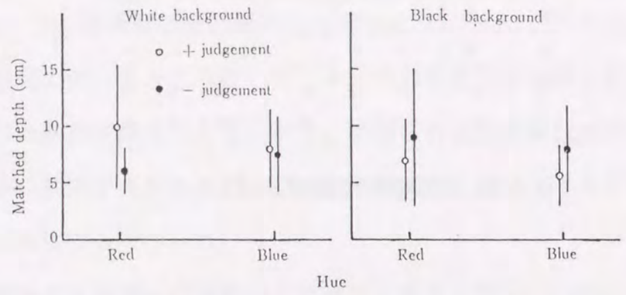


図２－２６　判断された奥行と標準刺激面の色相との関係。横軸は標準刺激の色研明度番号であり、図中の縦線分は標準偏差を表す。

-6、3.2PB 4.8/10.3）の6色が用いられた。そして、3種の無彩色と3種の有彩色との組合せによる9対、および有彩色同士の組合せによる3対で12種の刺激面が構成された。

手続　各刺激面は色の配置を逆にして2回ずつ計4回ランダムな順序で提示された。他は実験９と同じであった。

結果

被験者ごとに各刺激に対する第3および第4試行での判断された奥行を平均した値を表２－１７に示す。

Friedman 検定を行ったところ、無彩色－有彩色の対に関しては、黒、灰、白のいずれにおいても3種の有彩色間に、判断された奥行の統計的に有意な差は見られなかった（黒：$\chi^2(2)=3.93$, $p>0.10$。灰色：$\chi^2(2)=0.05$。白：$\chi^2(2)=1.41$）。

また、同じ有彩色について見ると、白や黒との組合せの場合に灰色との組合せの場合より、判断された奥行が大きい傾向が見られた。これは、実験1と同様、明るさの差違の影響が現れたものと考えられる。

有彩色同士の組合せにおいては、緑－青の組合せより青－赤の組合せの方が、また緑－青の組合せより赤－緑の組合せの方が、判断された奥行が大きくなる傾向が見られた。二項検定の結果、これらの傾向（前者は15名の被験者中12名、後者は13名）は5%の水準で統計的にも有意であった。しかし、赤－緑の組合せと青－赤の組合せの間には、判断された奥行に一貫した差違が見られなかった。

刺激面を構成する各色が手前と判断された頻度の全被験者にわたる合計を表２－１８に示す。無彩色と有彩色の組合せに関しては有彩色側が手前と判断された頻度を、有彩色同士の組合せについてはそれぞれの側が手前と判断された頻度を示してある。

表２－１７　判断された奥行

Subject	Unit	Achromatic-chromatic combination									Chromatic-chromatic combination		
		B/r	B/g	B/b	G/r	G/g	G/b	W/r	W/g	W/b	r/g	g/b	b/r
1	cm	1.25	1.75	2.50	1.50	0.55	0.55	0.10	1.50	1.00	3.00	0.10	1.50
2	mm	5.5	3.0	3.0	4.0	2.0	3.0	5.0	4.0	4.0	5.0	2.5	3.0
3	cm	3.0	3.5	3.0	2.0	2.0	2.0	3.0	2.5	3.0	2.0	1.5	3.0
4	cm	2.50	2.00	3.75	0.75	1.00	1.75	1.50	1.00	0.75	1.75	0.65	1.35
5	mm	4.0	4.5	5.0	2.0	2.5	3.5	4.5	4.0	2.5	2.0	2.5	2.0
6	mm	8.5	7.5	10.0	6.0	3.0	5.0	9.0	9.0	12.5	6.5	3.5	4.0
7	cm	0.50	1.00	0.75	0.75	1.00	0.75	1.00	1.00	1.00	1.00	0.75	1.00
8	cm	6.00	10.00	12.50	2.00	2.50	2.50	12.50	6.50	6.50	1.75	3.50	1.75
9	cm	2.5	2.5	3.0	1.0	1.0	1.0	3.0	4.0	3.5	2.0	1.0	2.5
10	cm	4.00	3.00	2.50	1.00	0.50	1.25	3.00	2.00	2.50	0.75	1.25	1.50
11	cm	95.0	102.5	92.5	30.0	42.5	35.0	85.0	87.5	82.5	20.0	15.0	22.5
12	cm	9.00	6.00	9.50	1.10	0.45	0.50	11.00	8.50	10.00	4.50	0.90	4.00
13	cm	20.0	17.5	20.0	2.0	3.0	1.0	3.0	5.0	5.0	3.0	1.0	4.0
14	cm	100.0	45.0	100.0	25.0	25.0	17.5	70.0	50.0	45.0	35.0	15.0	25.0
15	cm	4.00	7.00	9.00	1.50	1.50	1.50	4.00	6.00	5.50	2.50	1.25	3.50

注）Unit 欄は報告に用いられた単位である。B/r などは色の組合せを表し、B、G、W、r、g、b はそれぞれ色彩面の中の黒、灰、白、　赤、緑、青の領域を表す。

表２－１８　より近いと判断された回数

Achromatic-chromatic combination									Chromatic-chromatic combination		
B/r	B/g	B/b	G/r	G/g	G/b	W/r	W/g	W/b	r/g	g/b	b/r
									41	34	11
46	38	33	55	36	25	22	19	10	19	26	49

注）B/r などは色の組合せを表し、B、G、W、r、g、b はそれぞれ色彩面の中の黒、灰、白、赤、緑、青の領域を表す。

無彩色と有彩色の組合せの場合、有彩色側が手前と判断される頻度は、どの無彩色においても赤＞緑＞青の順であった。分散分析の結果、この傾向は統計的にも有意であった（黒：$F(2, 28)=8.98$, $p<0.01$。灰色：$F(2, 28)=15.75$, $p<0.01$。白：$F(2, 28)=6.74$, $p<0.01$）。

有彩色同士の組合せの場合、赤が緑や青より手前と判断されやすく、χ^2検定より、この傾向は統計的にも有意であった（赤－緑：$\chi^2(1)=8.07$, $p<0.01$。青－赤：$\chi^2(1)=24.07$, $p<0.01$）。また、緑が青より手前と判断されやすい傾向も見られたが、統計的には有意ではなかった（$\chi^2(1)=1.07$）。

考察

有彩色－無彩色と有彩色－有彩色のどちらの条件においても、手前に見える頻度は赤＞緑＞青の順となった。一方、見えの奥行量には色相による差違が見られなかった。したがって、Oyama & Yamamura (1960) の結果の説明としては、やはり第一の仮説の方が適当と結論できる。

また、上記の色相と手前に見える頻度との関係は、Oyama (1960) が報告した、色相と図になりやすさとの関係と全く同じである。このことからも、隣接する二つの色彩領域間の奥行知覚に関する一連の実験が、図－地知覚の一面、すなわち両者の三次元的分離をとらえているといえるであろう。

第１３節　色収差説および図－地知覚説の有効性

１３－１　Oyama & Yamamura (1960) の結果に関して

先に述べたように、図－地知覚説と長波長の色ほど図になりやすいと

いう事実とを組み合わせるとOyama & Yamamura (1960) の高照明条件の結果を説明できる。

また、低照明条件の結果は図－地知覚説から次のように説明できる。著者の観察によると、実験１４の条件下では、衝立と背景がともに黒色であるため両者の区別がつかなくなり、標準刺激面だけが闇の中に浮かんで見える。刺激布置がほぼ同じであるので、Oyama & Yamamura (1960) の場合も同様であったと推測される。これは、先に述べた暗室で透過光面を刺激として提示する場合と同じ状況であり、標準刺激面は図として安定すると考えられる。しかも、実験１６の結果から、標準刺激面の色相は背景（この場合は「闇」）との間の見え奥行に影響しないと推測される。したがって、標準刺激面の見えの距離は色相によらず一定になることが予測される。すなわち、この条件に関しても図－地知覚説が有効である。

二色型色覚の被験者の結果についても、図－地知覚説による次のような説明が可能である。二色型色覚の場合は、図になりやすさと色相との関係が三色型色覚とは異なる可能性がある。二色型第一および第二異常においては赤が緑や灰と混同されやすいことから、赤の図になりやすさが三色型色覚の場合ほど高くなく、緑や灰と同程度であると仮定しても無理はあるまい。さらに、識別可能な黄や青については、図になりやすさが三色型色覚と変わらないと仮定すれば、黄が最も進出し、青が最も後退、中間に赤、灰、緑が位置するという、二色型色覚の被験者に関する結果を説明することができよう。

また、８－１－３のまとめ（９）にあるように、色の異なる対象を近接させる一般的な刺激布置で人工瞳孔を用いた場合には、二色型色覚者でも三色型色覚者と同様な進出後退現象が起こることが知られている。

さらに、Kishto (1965)の実験における2名の二色型色覚の被験者は、人工瞳孔を用いなくとも、三色型色覚の被験者同様、高照明下では赤の進出、低照明下では青の進出を報告した。このように、二色型色覚者に関してもOyama & Yamamura (1960)の結果は特異である。特殊な刺激布置でのOyama & Yamamura (1960)の結果を一般化して、色収差説を全面的に否定することは不適切と言えよう。

１３－２　両眼視における色相の効果一般に関して

実験１６の結果は、隣接二領域が無彩色と有彩色からなる場合、無彩色の明るさに関わりなく、領域間の見えの奥行量は色相間で差がないことを示した。したがって、図－地知覚説にしたがえば、無彩色の背景に対して二つの色相の異なる小さな対象が提示される場合、対象と背景の見えの分離の程度（図２－９ｃまたは２－１７ｃの点線矢印が示す隔たり）は対象間で差がなく、対象は被験者から等距離に見える（図２－９ｃ実線矢印や２－１７ｃの破線矢印が示す距離が等しい。または、図２－１７ｃの実線矢印が示す隔たりがなくなる）ことが予測される。

両眼視の場合、この予測は先に見てきた多くの実験結果と一致しない。したがって、Oyama & Yamamura (1960)の報告や実験１３、１４の結果を除き、両眼視での色相の効果一般には図－地知覚説は適合しない。

ところで、単眼視での色相の効果に関しては、過去の報告が確定的でないため、図－地知覚説の有効性を十分検討することができない。単眼視でなされた実験１２に関しては、対象領域が赤と緑または赤と青である場合の結果は予測通りであるが、緑と青の条件に関しては予測と一致しない。したがって、この実験結果に関しても図－地知覚説の有効性を

断定することができない。

第９節で述べたとおり、色収差説は両眼視における色相の効果に関する既知の事実（８－１－３のまとめ（１）～（９））を全て説明できる。また、第１０節で述べたとおり、色収差説の検証を試みたほとんどの研究が色収差説を支持する結果を報告している。したがって、色収差説は、Oyama & Yamamura (1960)の刺激布置において見られた特殊な進出後退現象を除き、両眼視における色相の効果一般に対して十分有効であると結論できる。

第１４節　対象と背景がともに有彩色の場合の色相の効果

色相の効果に関するこれまでの議論は、全て、背景が暗黒あるいは無彩色の場合であった。一方、背景が有彩色の場合についての研究はきわめて少ない。Ittelson (1960)によると背景と色相が似ている対象ほど近く見えるという。また、Farne (1977)は、青と黄の正方形の対象を黄の背景上に提示した場合、青の対象が黄の対象がより近く見えることを報告している。

１４－１　実験１７

数少ない研究を補足するため、背景（周囲）が有彩色の場合に、対象と背景（周囲）との色相関係が対象の見えの距離にどのような影響を及ぼすかを調べた。

方法

被験者　被験者は視力、色覚ともに正常（矯正視力を含む）な15名の

大学生であった。

装置と刺激　実験３、１０、１２と同じ装置（図２－１を参照）が用いられた。衝立は明るさと彩度がほぼ等しい赤（色研番号では1-15-6、マンセル表示では4.0R 4.9/7.6）、緑（12-15-6、4.9G 4.6/9.0）、青（16-15-6、3.2PB 4.8/10.3）で、対象面は衝立よりやや彩度の低い赤（1-15-5、3.5R 4.8/5.9）、緑（12-15-5、5.7G 4.6/5.9）、青（16-15-5、2.4PB 4.7/8.5）であった。

手続　衝立の色ごとに、3種の対象色彩面の対は左右の配置を逆にして1回ずつ計2回ランダムな順序で提示された。3種の衝立の提示順序は被験者間でカウンターバランスさせた。他は実験１２と同じであった。

結果

各対象面がより近いと判断された頻度の全被験者にわたる合計を表２－１９に示す。一方の対象が周囲（衝立）と同じ色相の場合は、周囲と異なる色相の対象の方がより近く判断される傾向が明らかであった。χ^2検定の結果、これら頻度差は統計的にも有意であった（赤衝立・赤－緑対、赤衝立・青－赤対、緑衝立・赤－緑対、緑衝立・緑－青対および青衝立・青－赤対については、$\chi^2(1)=30.00$, $p<.01$。青衝立・緑－青対では、$\chi^2(1)=22.53$, $p<.01$）。対象がともに周囲と異なる色相の場合、周囲が緑なら青より赤の方が、周囲が青なら緑より赤の方が明らかに近く判断されやすかった（それぞれ、$\chi^2(1)=10.80$, $p<.01$、$\chi^2(1)=30.00$, $p<.01$）。また、周囲が赤の場合、統計的には有意ではない（$\chi^2(1)=2.13$）が、緑より青の方が近いと判断されやすかった。

考察

衝立と同じ色相の対象より異なる色相の対象の方が近く見えやすいという結果はFarne (1977)の報告と一致するものである。また、衝立が

表２－１９　より近いと判断された回数

衝立	対象面の色相の組合せ					
	赤－緑		緑－青		青－赤	
赤	0	30	11	19	30	0
緑	30	0	0	30	6	24
青	30	0	28	2	0	30

緑で対象が赤と青の場合や、衝立が青で対象が赤と緑の場合に赤が進出するという結果も、光の波長あるいは色相環において緑と青の類似度は緑と赤あるいは青と赤の類似度より高いと考えられるので、Ittelson(1960)の指摘と一致すると言えよう。

１４－２　見えの大きさ説

もし、背景と対象の色相の組合せが対象の見えの大きさに影響するのなら、有彩色背景での進出後退現象に見えの大きさ説を適用できる可能性がある。この点についてOshima et al.（1952)は、両者が補色の場合に見えの大きさは最大になり、同色相の場合に最小になる可能性を示唆した。

また、Oyama & Nanri（1960)は、前述の装置を用い、正方形部分を円盤部分よりやや明度の高い赤（マンセル表示で5.0R 4.2/3.0）、黄（5.0Y 8.5/12.0）、緑（5.0G 5.5/8.5）、青（2.5PB 4.3/10.0）のいずれかとして、色相の組合せの効果を調べた。その結果、円盤と背景の色相が異なる条件の方が、同じ色相の条件より見えの大きさがやや大きくなる傾向が見られたが、色相の組合わせの種類と見えの大きさとの一貫した関係は見られなかった。

玉池（1935）も、前述の装置で標準刺激の内部円と外部環の色を赤、黄、緑、青の相互の組合せとする実験を行ったが、色相の組合せの系統的な効果は見出せなかった。

このように、背景や対象の色相と見えの大きさとの関係が明瞭でないため、背景が無彩色の場合と同様、見えの大きさ説の有効性については確かな結論が下せない。

１４－３　図－地知覚説

実験１７では、衝立が緑で対象が赤と青の場合や、衝立が青で対象が赤と緑の場合に赤が進出する傾向がみられた。この結果は、図－地知覚説と実験１６の結果（隣接二領域が赤－緑や青－赤の組合せである場合の方が緑－青の場合より見えの奥行量が大きくなる）とを結びつけることによって説明できる。対象領域が小さい実験１７の刺激布置では両対象とも図となって周囲領域から前方へ分離して見えるが、周囲が青（緑）で対象が赤と緑（赤と青）の場合、その分離の程度は赤の方が大きく、したがって赤が進出して見えることが予測される（図２－１７の各色を有彩色に置き換えればよい）からである。

また、実験１６では隣接二領域が赤－緑の場合と青－赤の場合との間に見えの奥行量の一貫した差異が見られなかった。したがって、図－地知覚説にしたがうと、周囲が赤の場合は緑対象と青対象が同じ距離に見えることが予測される。しかし、この予測は実験１７の結果と一致しない。実験１７の結果は、統計的には有意でなかったが、赤衝立では緑より青の方が近くに見えやすいという傾向を示したからである。しかし、全般的に見て、対象と周囲あるいは背景との色相関係が対象の見えの距離に影響し、その影響の現れ方は図－地知覚説からの予測に一致すると結論しても大きな問題はあるまい。

第１５節　彩度の効果

１５－１　諸研究

色の三属性のうち、彩度の距離知覚への影響を調べた研究も、きわめて少ない。Mount et al. (1956)は、既に述べたように、屋外において黄褐色の土手を背景に見る場合、種々の有彩色の対象がそれらと同程度の明度を持つ灰色より近く見えることを報告し、有彩色対象の方が背景との彩度の差違が大きいことに起因すると解釈した。

Oyama & Yamamura (1960)は彩度の効果も検討している。彼らは、先に述べた装置の標準刺激面に、明るさが等しく彩度が異なる5種類の赤（2.5R 4.5/2.0、2.5R 4.5/4.0、2.5R 4.5/7.0、2.5R 4.5/10.0、2.5R 4.5/14.0）と3種類の青（2.5PB 4.0/3.0、2.5PB 4.0/6.0、2.5PB 4.0/10.0）を用いた。見えの距離は、類似の明るさの灰色（N 4.1/）に比べて、赤では小さく、青では大きかった。また、赤の場合、彩度が増すと見えの距離は減少したが、青の場合は増加した。ただし、青の場合の彩度の効果は統計的には有意ではなかった。

また、Troscianko et al., (1991)は、彩度の勾配が面の奥行方向への傾きの知覚を生むことを報告した。彼らは、先に述べた方法を用い、赤い正方形の彩度が画面の下部の正方形から上部の正方形へと徐々に低くなる刺激パタンを提示した。その結果、画面の上部ほど遠いという傾きが知覚され、その程度は全ての正方形の彩度が等しい条件より明らかに大きかった。

１５－２　実験１８

Mount et al. (1956)の結果は両眼視の場合のものであったので、単眼視の場合の距離判断への彩度の効果を調べた。また、研究例のない、背

景が全対象より高い彩度を持つ条件についても検討した（江草, 1981において報告）。

方法

被験者　視力、色覚ともに正常（矯正視力を含む）な大学生30名で、無彩色衝立条件と有彩色衝立条件とに15名ずつ割り振られた。有彩色衝立条件の被験者は実験１７にも参加した。

装置と刺激　実験３、１０、１２、１７と同じ装置（図２－１を参照）が用いられた。対象面の色は、明度の等しい赤、緑、青の彩度の低いもの（色研番号は1-15-2、12-15-2、16-15-2。マンセル表示で2.9R 4.9/2.1、1.8BG 4.6/1.8、1.6PB 4.7/3.3）と高いもの（1-15-5、12-15-5、16-15-5。3.5R 4.8/5.9、5.7G 4.6/5.9、2.4PB 4.7/8.5）およびそれらと明るさの等しい灰色（0-15-0、N4.7/0.0）であった。色相ごとに、灰色と低彩度、低彩度と高彩度、高彩度と灰色が対にされ、左右の対象面として提示された。衝立には、対象面に用いられたものよりやや明るい灰色（マンセルバリューが5.2～5.4）または有彩色が用いられた。有彩色衝立は対象面に用いられたものより彩度の高い赤、緑、青（色研番号は1-15-6、12-15-6、16-15-6。マンセル表示では4.0R 4.9/7.6、4.9G 4.6/9.0、3.2PB 4.8/10.3）であり、対象面の各対に対してそれらと同じ色相の衝立が割り当てられた。

手続　被験者の課題は、左右の長方形のどちらが手前に見えるかを判断し、さらに両者の間の見えの奥行量を任意の単位（cm、mm など）で見積もって、口頭で報告することであった。ただし、対象領域の一つでも衝立の背後に見えると被験者が報告した場合は、その試行を中止し後で再度実施した。

無彩色背景条件の場合、3種の色相条件と3種の彩度条件の組合せによ

る9種の対象面対は、左右の位置を逆にして1回ずつ計2回提示された。有彩色衝立条件の場合は、衝立ごとに、3種の対象色彩面の対は左右の配置を逆にして1回ずつ計2回ランダムな順序で提示された。3種の衝立の提示順序は被験者間でカウンターバランスさせた。

結果

15名の被験者の判断を込みにした場合の、対をなす対象面の各々がより近く見えると判断された頻度を表２－２０に示す。無彩色衝立条件、すなわち両対象面とも衝立より彩度が高い場合は彩度の高い方が高い頻度でより近いと判断された。一方、有彩色衝立条件、すなわち両対象面とも衝立より彩度が低い場合は彩度の低い方がより近いと判断されやすかった。すなわち、衝立との彩度の差が大きい対象面ほどより近く見えやすいという結果となった。χ^2検定の結果、全条件において頻度差が有意となった（24対6と頻度差が最も少ない条件で、$\chi^2(1)=10.80$, $p<.01$）。

各色相条件の無彩色と高彩度の組合せを含む二つ以上の彩度条件おいて、2回の判断がともに上記の一般的傾向と一致した被験者について、判断された奥行量を表２－２１に示す。表中の数値は2回の判断の平均値である。どの色相においても、対をなす対象面間の彩度の差が大きいほど、判断された奥行が大きくなる傾向が見られた。無彩色背景の場合、判断された奥行が無彩色－低彩度条件より彩度差の大きい無彩色－高彩度条件で大きくなった人数は、赤では比較可能な10名中8名、緑では10名全員、青では9名中8名であった。また、低彩度－高彩度条件より彩度差の大きい無彩色－高彩度条件で判断された奥行が大きくなった人数は、赤では11名中10名、緑では9名全員、青では11名中9名であった。有彩色背景の場合、無彩色－低彩度条件より無彩色－高彩度条件で判断された奥行が

表２－２０　より近いと判断された回数

衝立	色相	対象面の彩度の組合せ					
		無－低		低－高		高－無	
無彩色	赤	4	26	3	27	29	1
	緑	6	24	6	24	28	2
	青	6	24	3	27	29	1
有彩色	赤	28	2	29	1	0	30
	緑	24	6	30	0	0	30
	青	25	5	30	0	0	30

注）彩度の組合せの無は無彩色を、低は低彩度を、高は高彩度を表す。

表２－２１　判断された奥行（cm）

		色相								
		赤			緑			青		
		対象面の彩度の組合せ			対象面の彩度の組合せ			対象面の彩度の組合せ		
背景	被験者	無－低	低－高	高－無	無－低	低－高	高－無	無－低	低－高	高－無
無彩色	1	6.00	3.00	6.00	2.00	1.50	5.00		1.50	5.50
	2	2.00		10.00	3.00		10.00	3.00		7.50
	3	0.75	1.00	1.50	0.75	1.00	1.25	1.50	0.75	2.00
	4	0.75	1.50	1.75					2.25	3.25
	5	1.75		7.50	1.50		4.00			
	6				1.25	1.00	2.00	0.10	1.50	2.00
	7								0.75	2.50
	8		2.50	3.00	0.75	1.00	3.00	2.75	1.25	3.00
	9	1.00	1.00	2.50				1.50	1.50	1.50
	10	4.00	3.00	10.00	4.50	6.00	8.50	6.50	7.50	11.00
	11		1.75	1.25	0.75	1.50	3.00	1.50		2.25
	12	1.50	2.50	5.00	1.50	1.50	5.00	1.25	3.50	2.50
	13	2.00	1.50	2.00		1.00	3.00		1.50	2.50
	14	2.00	4.00	5.00	2.00	2.50	4.00	2.50	3.50	4.50
	15		1.75	2.00						
有彩色	16	0.90	2.00	2.00	0.70	3.20	2.75		1.40	1.25
	17	1.75	2.25	3.50		1.50	2.00		1.25	2.25
	18	3.50	8.50	15.50	8.00	21.50	25.00	2.00	15.00	17.50
	19	1.50		1.50		2.50	4.00	1.00	2.50	2.50
	20		2.50	3.00	1.75	4.50	4.50	1.25	2.00	2.00
	21	0.75	1.25	2.10		2.15	3.00	1.75	0.90	2.00
	22	0.75	2.50	4.50	2.00	4.00	5.00	1.50	1.50	1.50
	23		2.50	4.50		2.50	5.50	1.50	2.00	4.00
	24	15.00	11.50	17.50	12.50	12.50	22.50	7.50	7.50	12.50
	25	1.00	2.00	3.00		2.25	2.25	2.00	2.00	2.00
	26	1.75	3.50	6.50	3.50	5.00	7.00	2.00	3.50	5.00
	27	0.25	0.35	0.35	0.25	0.50	1.50	0.40	0.50	0.75
	28	2.00	8.50	10.00	2.00	6.50	6.50		3.00	4.00
	29	6.00	9.00	16.00		8.00	7.50		6.00	4.50
	30	0.65	3.50	2.50	1.25	1.50	2.50		2.50	5.50

注）彩度の組合せの無は無彩色を、低は低彩度を、高は高彩度を表す。

大きくなった人数は、赤では13名中12名、緑では9名全員、青では10名中8名であった。また、低彩度－高彩度条件より無彩色－高彩度条件で判断された奥行が大きくなった人数は、赤では14名中11名、緑では15名中10名、青では15名中9名であった。

１５－３　見えの大きさ説、過去経験説および図－地知覚説

この場合も見えの大きさ説が適用可能だが、対象の彩度と見えの大きさの関係を調べた研究はきわめて少ない。Tedford, Bergquist, & Flynn (1977)は、灰色の背景上の一辺87.3mmの正方形の色紙を撮影した2枚のスライドをスクリーンに映写して刺激とし、8mの距離から観察させた。正方形の色として明度の等しい赤、黄、緑、青の各々について2種類の彩度のもの（マンセル表示でRP 5/4、RP 5/8、YR 5/4、YR 5/8、G 5/4、G 5/8、PB 5/4、PB 5/8）が用意され、対提示された。100名の被験者に、各対のどちらの正方形がより大きく見えるかを判断させたところ、どの色相でも彩度が低い方が大きく判断される傾向が見られた。

Tedford et al. (1977)結果に基づくと、見えの大きさ説からは背景が無彩色の場合には彩度が低い対象ほどより近く見えることが予測される。しかし、この予測は実験的事実と一致しない。また、既に述べたように、Bevan & Dukes (1953)の実験では見えの大きさに対する彩度（純度）の効果が現れなかった。基礎的データの不足のため断定はできないが、見えの大きさ説は彩度の効果に対しては不適切と言えよう。

また、Troscianko et al., (1991)は、彩度の効果は大気遠近現象に関する日常経験に起因すると主張している。しかし、日常的な大気遠近現象は、遠方のものほど彩度が下がるというものであり、この説は背景の

彩度が低い場合（Troscianko et al. の実験では背景は灰色であった）にしか当てはまらない。

したがって、残るは図－地知覚説である。ただし、図－地知覚説を適用するためには、まず図と地の間あるいは隣接二領域間の見えの奥行量が領域間の彩度差に依存することが示されねばならない。実験１９では、その確認を行った（Egusa, 1983において実験３として報告）。

１５－４　実験１９

方法

被験者　視力、色覚ともに正常（ただし、視力については矯正視力を含む）で、実験９または１６の参加者を含む15名の大学生であった。

装置と刺激　実験９、１６と同じ装置（図２－１６を参照）が用いられた。刺激面には彩度の低い赤、緑、青（色研番号では1-15-2、12-15-2、16-15-2。マンセル表示では2.9R 4.9/2.1、1.8BG 4.6/1.8、1.6PB 4.7/3.3）および彩度の高い赤、緑、青（1-15-6、12-15-6、16-15-6または4.0R 4.9/7.6、4.9G 4.6/9.0、3.2PB 4.8/10.3）に灰色（0-15-0またはN4.7/0.0）を加えた7色が用いられた。そして、色相ごとに、灰色と低彩度色、低彩度色と高彩度色、高彩度色と灰色が組み合わされ、計9種の刺激が用意された。

手続　実験１６と同じであった。

結果

被験者ごとに各刺激に対する第3および第4試行での判断された奥行を平均した値を表２－２２に示す。どの色相においても、判断された奥行が、灰色－低彩度色＜低彩度色－高彩度色＜高彩度色－灰色の順に大き

くなる傾向が見られた。言い換えると、隣接領域間の彩度の差が大きいほど見えの奥行量は増す傾向にあった。Friedman 検定の結果、この傾向は統計的にも有意であった（赤の場合、$\chi^2(2)=24.27$、$p<0.01$。緑の場合、$\chi^2(2)=17.29$、$p<0.01$。青の場合、$\chi^2(2)=14.14$、$p<0.01$）。

刺激を構成する各色が手前と判断された頻度の全被験者にわたる合計を表２－２３に示す。手前の判断と彩度との関係は色相によって異なっていた。赤においては、隣接領域のうちより彩度の高い方が手前と判断されやすく、χ^2検定より、この傾向は統計的にも有意であった（灰色－低彩度では$\chi^2(1)=11.27$、$p<0.01$。低彩度－高彩度では$\chi^2(1)=13.07$、$p<0.01$。高彩度－灰色では$\chi^2(1)=45.07$、$p<0.01$）。緑の場合は、高彩度が低彩度や灰色より手前と判断されやすく、灰色が低彩度より手前と判断されやすいという傾向であったが、統計的に有意なのは最後の傾向だけであった（$\chi^2(1)=4.27$、$p<0.05$）。青においては、彩度の低い方が手前と判断されやすい傾向であったが、統計的に有意であったのは高彩度－灰色の場合だけであった（$\chi^2(1)=4.27$、$p<0.05$）。

１５－５　図－地知覚説の有効性

実験１９の結果は、隣接二領域間の彩度の差が大きいほど領域間の見えの奥行量が増すことを示した。この結果と図－地知覚仮説とを組み合わせると、対象が図となる刺激布置では、色相が同じなら背景との彩度の差の大きい対象ほど進出することが予測される（図２－１７の黒を灰色、暗灰を低彩度、明灰を高彩度に置き換えるか、あるいは黒を高彩度、暗灰を灰色、明灰を低彩度に置き換えるとよい）。そして、この予測は既知の事実と一致する。

表２－２２　判断された奥行

Subject	Unit	Red			Green			Blue		
		MG/LS	LS/HS	HS/MG	MG/LS	LS/HS	HS/MG	MG/LS	LS/HS	HS/MG
1	mm	1.0	3.0	20.0	1.5	1.0	15.0	3.0	7.5	30.0
2	mm	1.5	2.5	10.0	1.5	3.5	6.5	3.5	2.5	5.0
3	cm	1.00	2.50	2.00	0.75	1.50	2.00	1.00	2.00	3.00
4	mm	2.0	3.0	3.0	2.0	2.5	3.5	2.5	2.5	3.5
5	cm	1.5	1.5	2.0	1.0	1.5	2.0	1.5	1.5	2.5
6	cm	0.50	1.50	1.50	2.00	1.50	2.50	2.00	1.25	1.00
7	cm	0.75	2.00	2.00	0.50	1.50	4.00	1.00	2.50	3.00
8	cm	0.50	1.50	3.00	0.50	0.50	0.50	0.75	1.50	2.00
9	cm	8.0	17.5	40.0	3.0	4.5	30.0	4.5	27.5	55.00
10	cm	0.20	3.25	4.00	0.10	0.30	1.45	0.65	0.40	4.50
11	mm	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1.0	1.0	1.5	1.0
12	cm	2.00	3.00	8.50	0.75	6.00	4.00	1.50	3.50	4.00
13	cm	1.0	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	2.0
14	cm	0.10	0.30	0.50	0.10	0.25	0.40	0.20	0.40	0.35
15	mm	1.00	1.50	3.00	0.55	1.25	1.50	0.75	1.25	2.00

注）Unit 欄は報告に用いられた単位である。MG/LS などは色の組合せを表し、MG、LS、HS はそれぞれ灰色、低彩度、高彩度を表す。

表２－２３　より近いと判断された回数

Red			Green			Blue		
MG/LS	LS/HS	HS/MG	MG/LS	LS/HS	HS/MG	MG/LS	LS/HS	HS/MG
17	16	56	38	26	34	33	32	22
43	44	4	22	34	26	27	28	38

注）MG/LS などは色の組合せを表し、MG、LS、HS はそれぞれ灰色、低彩度、高彩度を表す。

また、赤では彩度の高い領域が、青では彩度の低い領域が手前と見えやすかった。この結果からは、１２－５と同じ推論の筋道で、Oyama & Yamamura (1960)の刺激布置では、標準刺激面が赤の場合は彩度が高いほど、青の場合は彩度が低いほど、標準刺激面が図となって無彩色の背景面の前方に知覚される機会が多いことが予測される。その結果、測定された見えの距離の平均値は、赤の場合は彩度が高いほど小さく、青の場合は彩度が高いほど大きくなるはずである。そして、この予測はOyama & Yamamura (1960)の結果と一致する。

以上のことから、図－地知覚説は彩度の効果に対しても有効であると結論できる。

第３章　奥行情報の伝達者としての色

第１節　等輝度刺激による奥行知覚

１－１　Livingstone & Hubel (1987, 1988)の報告

Livingstone & Hubel (1987, 1988)は、序で述べた視覚神経系の細胞の応答特性に関する知見に基づいて、M経路では刺激の中の明るさが同じで色のみ異なる領域の境界は検出されないと仮定した。そして、明るさの差異を含まず、色の差異のみで構成された刺激パタン（以下、等輝度刺激と呼ぶ）に対しては奥行や運動の知覚は生じえないと推測した。その推測を検証するために、彼らは、天井から照明された薄暗い部屋で、コンピュータディスプレイ上に赤（色度はx=0.61、y=0.35）または緑（x=0.31、y=0.59）の蛍光体のみを発色させて描かれた様々な刺激を観察した。その際、赤と緑の相対的な明るさを様々な値に設定した。その結果、等輝度状態では、様々な種類の奥行知覚が消失したり、あるいは著しく減退することが示された。彼らは、奥行知覚以外にも、運動や形態など種々の知覚的属性について観察を行っているが、ここでは奥行知覚についての報告だけを紹介する。

たとえば、立体視が成立すると刺激パタンの中央に正方形が周囲から浮き出すか、あるいは沈んで見えるランダムドットステレオグラム（図３－１を参照）を赤と緑のドットで描いた場合、赤と緑の明るさの差がある程度以下になると、見えの奥行方向判断の正答率がチャンスレベルに落ちるほど奥行印象が弱まった。被験者によっては見えの奥行が完全に消失した。ただし、奥行知覚が減退する、赤と緑の明るさ比の範囲は

図３－１　ランダムドットステレオグラム（Julesz, 1971のp. 156の5. 4-3）

狭かった。また、奥行知覚が最も弱まる明るさ比は、被験者によって異なり、交照法で求められた等輝度ともやや異なっていた。

一方、図３－２のような図形ステレオグラム（赤または緑の正方形や長方形が緑または赤の背景上に描かれる）の場合は、提示時間が長いと、いかなる明るさ比においても明瞭な見えの奥行が生じた。図３－２ｂのように図形が大きいと、提示時間を短く（0.05秒）しても見えの奥行は維持された（図３－３）。しかし、図３－１のａのように図形が小さく（一辺0.25°）、提示時間が短い場合には、ある明るさ比において見えの奥行方向判断の精度がチャンスレベルにまで低下した。ただし、この場合も奥行知覚が損なわれる明るさ比の範囲はきわめて狭かった（図３－３）。

そして、図形の大きさによる結果の差違に関しては、網膜の位置によって等輝度状態が異なるため、図形が大きい場合には網膜像が性質の異なる網膜部位にまたがり、等輝度の条件が満たされなくなることによると解釈された。彼らは、交照法で決定した等輝度が中心窩とその周辺とで異なることも報告している。また、提示時間による差違については、提示時間が長いと眼球運動によって網膜像の網膜上の位置が変って、やはり等輝度の条件が満たされなくなることによると解釈された。

また、絵画的手がかりによる奥行知覚の消失も報告された。たとえば、図３－４の図形（実際の刺激は白と黒ではなく赤と緑で描かれる）では、通常、きめの勾配の手がかりによって図形の上部ほど遠方にある傾いた面が知覚される。しかし、等輝度条件では、傾きの印象が減少し、場合によっては垂直な面が知覚された。特に、どこかを固視した場合に顕著であった。また、図３－５の図形の場合、白黒図形では円の上に正方形が重なっていると見えるが、等輝度条件では正方形と一部の欠けた円が

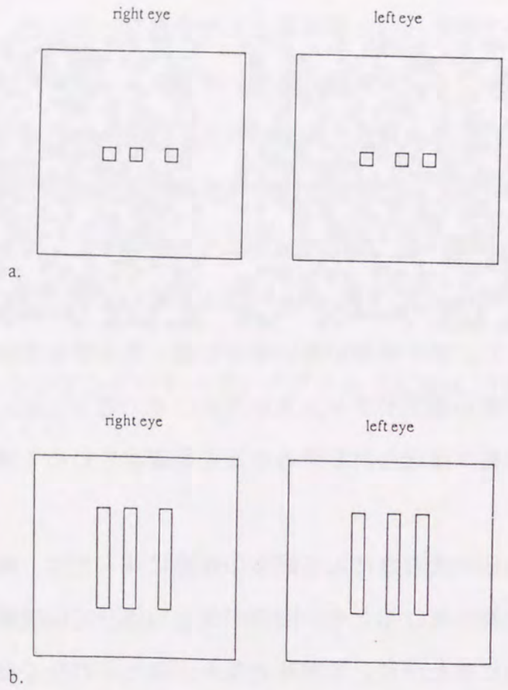


図３－２　Livingstone & Hubel（1987）の図形ステレオグラム

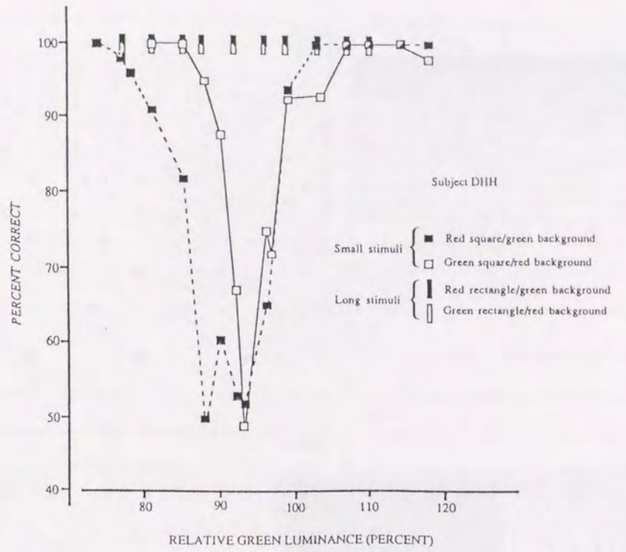


図３－３　Livingstone & Hubel（1987）の図形ステレオグラムの実験結果（被験者1名）。横軸は図形と背景とのコントラストで、100が等輝度を表す。縦軸は網膜像差方向と判断された奥行方向との一致率を表す。

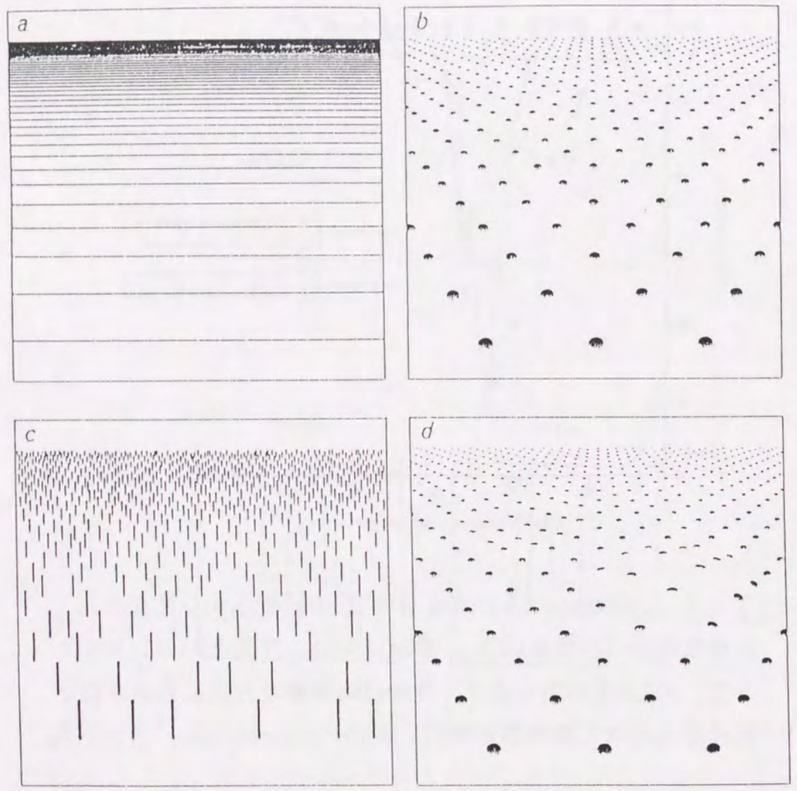


図３－４　Livingstone & Hubel（1987）のきめの勾配図形

図３－５　Livingstone & Hubel（1987）の重なり図形

同じ平面上に見えた。図３－６の図形は、通常、自分から遠ざかる方向に伸びる廊下に見え、右にある円筒ほど長く見える。しかし、等輝度では、奥行感は失われ、円筒は全て同じ長さに見えると主張された。

さらに、運動視差による奥行知覚や運動奥行効果も等輝度刺激では消失すると報告された。前者に関しては、3本の棒が横に並んでおり、被験者が体を左右に動かすとそれに同期して中央の棒の位置が左右に変化する刺激パタンが用いられた（図３－７）。これは、被験者から異なる距離にある3本の棒（中央の棒が両側の棒より近くまたは遠くにある）を体を左右に動かしながら見る場合の網膜像をシミュレートしたものであった。後者に関しては、図３－８のようなランダムなドットの配置が連続的に変化する刺激パタンが用いられた。これは、表面にドット模様のある透明な球体が垂直軸の回りに回転しているのを観察する際の網膜像をシミュレートしたものであった。また、図３－９のような図形を中心の回りに回転させると首を振るように動く円錐が知覚され、回転立体視（stereokinetic effect）と呼ばれるが、この現象も等輝度刺激では消失し、図形は平面的に見えることが報告された。

１－２　等輝度ランダムドットステレオグラムによる両眼立体視

１－２－１　奥行知覚の消失あるいは劣化の報告

等輝度条件でのランダムドットステレオグラムによる奥行知覚の消失は他の研究者によっても確認されている。

この現象を初めて報告したのはLu & Fender (1972)であった。彼らは、図３－１０のような光路を持つ光学系を用いて、100×100のマトリ

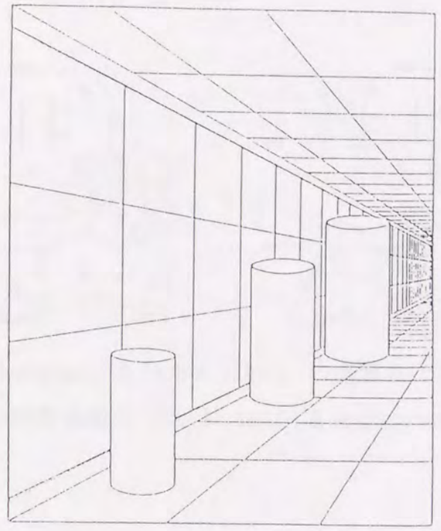


図３－６　Livingstone & Hubel (1988) の線遠近法図形

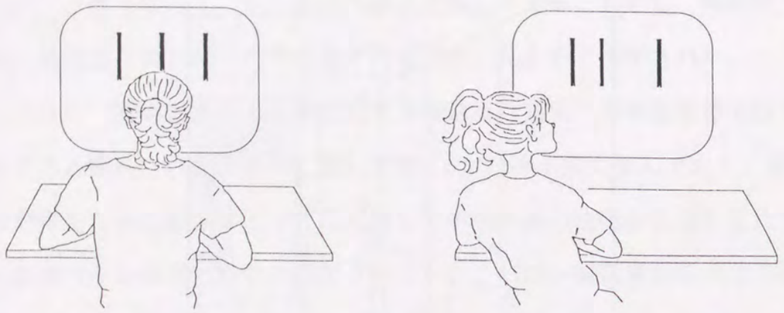


図３－７　Livingstone & Hubel（1987）の運動視差の説明図

図３－８　Livingstone & Hubel（1987）の運動奥行効果用の刺激

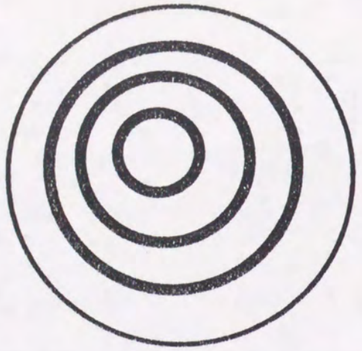


図３－９　Livingstone & Hubel (1987) の回転立体視用の刺激

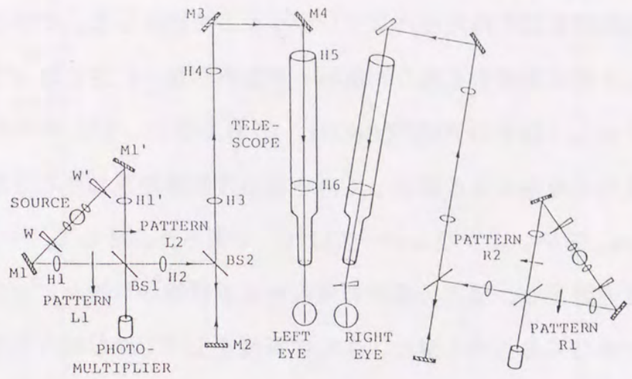


図３－１０　Lu & Fender (1972)の装置の略図

ックスを同数の2色の要素でランダムに埋め、中央の40×40の部分に4要素分の交差網膜像差を持たせたステレオグラムを提示した。そのために、透明要素と不透明要素から成り、透明・不透明が互いに逆になっている一対のフィルム（図中の PATTERN-R1、R2および L1、L2）を作り、それぞれに異なる波長の光を照射して得られる投影像を重ね合わせた。観察距離は1m、ステレオグラムの一辺は10°であった。そして、一方の要素の輝度を固定し、他方の要素の輝度を暗黒状態から徐々に上げて奥行が知覚できなくなる値を求め、さらに輝度を上げて再び奥行が知覚されるようになる値を求めた。その結果、ある程度の輝度差がないと奥行が知覚されないことが示された（図３－１１を参照。図は一方の要素が赤（634nm）の場合の結果を示す）。また、その輝度差は波長の組合せによって異なった。

Gregory (1977)は、図３－１２のような投影機で刺激図形（図３－１と同じ）を白色スクリーンに映写した。透明なフィルムの一部を反射率の高い白色の塗料で覆い（図中の silk-screen print）、透明部分を背後から、不透明白色部分を前面から色光で照明し、赤と緑の部分から成る刺激図形を構成した。スクリーン上の輝度は35cd/m²、観察距離は4m であった。緑の領域と赤の領域が等輝度になると見えの奥行は完全に消失したが、わずかでも明るさがずれると回復した。また、見えの奥行が消失した状態でも個々のドットははっきり見えていた。

de Weert (1979) は、図３－１３のような光学系を用いてステレオグラムを提示した。ステレオグラムを構成する要素は24.2′×13.5′の大きさで、中央の6.45°×3.6°の長方形の領域に13.5′の両眼網膜像差が与えられた。光路には一部が反射面で一部が透過面の鏡（図中の SM）が置かれ、それを背後から照明することで一方の色の要素群が、前面を

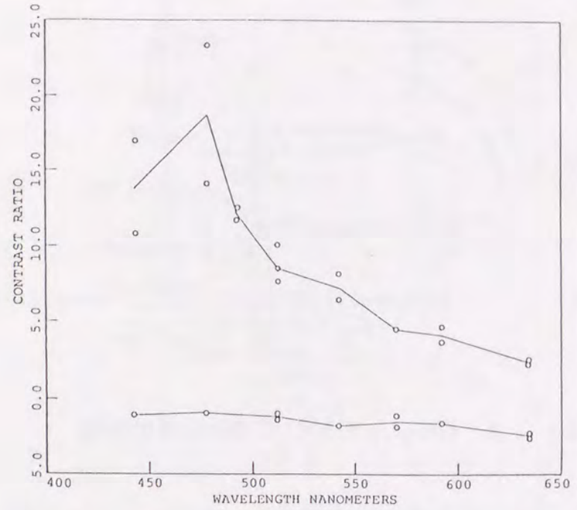


図３－１１　Lu & Fender (1972)の Fig. 3（一方の要素が634 nm の場合の結果）。横軸は要素の波長を、縦軸は要素間のコントラストを表す。縦軸の0.0が等輝度で、それより上の目盛りは634nm の要素が他方の要素より明るいことを、下の目盛りはより暗いことを示す。2本の折れ線の間が奥行の知覚されない範囲である。

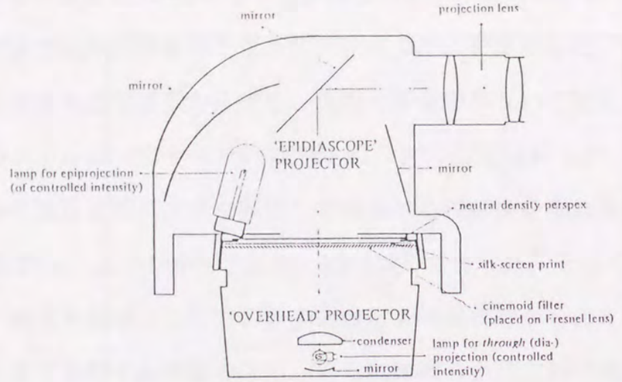


図３－１２　Gregory (1977)の実験装置の略図

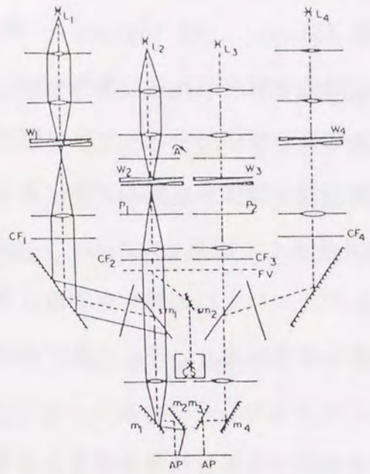


図３－１３　de Weert (1979)の実験装置の略図

照射することでもう一方の色の要素群が作り出された。要素の色は、赤（主波長は627nm）、黄（584nm）、緑（521nm）、青（498nm）のうちの2色の組合せ6通りと同色で輝度が異なる場合4通りであった。一方の要素の輝度は交照法で基準光と等輝度とされた値に固定され、その値に対する、もう一方の要素の相対輝度が連続的に変化させられた。被験者は、直径2mmの人工瞳孔を通して観察しながら、一方の要素の相対輝度を最低または最大のレベル（いずれの場合も明瞭な奥行が知覚される）から徐々に上昇あるいは下降させ、見えの奥行が消失する値と再び出現する値を求めた。

その結果、要素間に色の違いがありパタンが見える場合でも、ある程度以上の明るさの差がないと立体視が消失することが明らかになった。ただし、その程度は色の組合せによって異なった。同色条件の場合、立体視成立に必要な明るさの差違は波長によらずほぼ一定であった。これらの結果から、色差の情報は単独では立体視機構を駆動できないが、輝度差の情報と結合することで立体視に寄与しうると推論された。

Livingstone（1996）は、誘発電位を指標とした。刺激として40′の大きさで緑および赤の要素からなる30°×30°のランダムドットパタンがコンピュータディスプレイ上に提示された。中央の18°×18°の部分に40′または8′の交差または非交差網膜像差が与えられた。観察距離は0.5mであった。そして、左右の眼の前に置かれた液晶シャッターを各々60Hzで交互に開閉し、それに同期させて左眼または右眼用のステレオグラムが提示された。交差刺激と非交差刺激が0.5秒ずつ交互に200秒間提示され、刺激観察中の誘発電位が記録された。また、ベースラインとして網膜像差を持たない刺激が連続提示される場合の誘発電位が記録された。緑の輝度は0.5cd/m2に固定され、赤の輝度は緑との等輝度を中

心に3段階に設定された。等輝度は見えの奥行が最も不鮮明になる条件として定義された。

網膜像差方向が交替する刺激に対する誘発電位の変動幅は、輝度差がある条件ではベースラインより大きかったが、等輝度条件ではベースラインと差がなかった。この結果より、ランダムドットステレオグラムによる奥行知覚は等輝度で消失するか、そうでなくとも明らかに劣化すると結論された。

Jimenez, Rubino, Hita, & Del Barco（1997）は、色覚機構と両眼立体視との関係をより詳しく検討した。そのため、赤－緑、黄－青、明るさの三つの次元からなる色表現のモデルを前提とし、特定の次元においてのみ異なる色の対でステレオグラムを構成した。大きさ2′の要素からなるステレオグラムが、コンピュータディスプレイ上に提示され、鏡式ステレオスコープを通して観察された。ステレオグラム中央の80′四方の部分に網膜像差が与えられた。輝度のみ異なる要素（4および14cd/m^2）で構成されるステレオグラムの色は、3種の蛍光体単独の発色による赤、緑、青または白色のいずれかであった。色のみ異なる要素のステレオグラムには、上記の赤－緑次元で異なる4対の色および二色型第三色覚の混同色線上の4対の色が用いられ、各色の輝度は交照法で12cd/m^{2}の白色と等輝度になるように設定された。ステレオグラムの周囲は0.5または12cd/m^{2}の白色であった。被験者は0.5秒間観察して中央の正方形と周囲との間に奥行が見えるかどうかを報告した。そして、立体視可能な最大の網膜像差を求められた。

その結果、2色型第3色覚の混同色線上の色の条件では、4名の被験者全員において立体視が全く成立しなかった。また、観察時間を制限しない場合でも結果は同じであった。ただ、被験者のうちの2名は要素の大きさ

を14′まで大きくしても立体視は生じなかったが、他の2名は4′の要素で立体視が可能になった。また、立体視可能な網膜像差の最大値は、輝度差あり条件＞赤－緑次元での差あり条件＞2色型第3色覚の混同色線上での差あり条件、の順となった。これら結果から、網膜像差の処理効率は色差情報より輝度差情報に基づく方が高く、また、色情報の中でも赤－緑経路の情報の方が黄－青経路の情報より有効であると結論された。

Kingdom, Simmons, & Rainville (1999)は、コンピュータディスプレイ上に一辺10.7°のステレオグラムを提示した。要素は一辺6′で、ステレオグラムの中心の5.35°四方の領域に交差または非交差の網膜像差が与えられた。そして、眼球の色収差による輝度差の発生を防止するため、これらのステレオグラムに高空間周波数成分を除去するフィルター処理を施したものが提示された。ステレオグラムの色は赤（x=0.623、y=0.340）と緑（x=0.278、y=0.584）を同位相または逆位相で重ね合わせて作り出され、周囲は一様な黄、刺激全体の平均輝度は8.0cd/m²であった。赤と緑の等輝度は見えの奥行が最も不明瞭になる輝度比として定義された。被験者は鏡式のステレオスコープを通して観察し、2回の刺激提示のどちらで指定された種類の奥行が感じられたか、またはドットが見えたかを報告した。そして、階段法の手続で、奥行方向弁別あるいはパタン検出に関する輝度または色のコントラスト閾値が求められた。

その結果、パタン検出閾値に対する比で表された奥行弁別の閾値は輝度差刺激（黄の明暗パタン）より色差刺激（等輝度の赤緑パタン）の方が高かった。次ぎに、網膜像差を持つ領域を縦長あるいは横長の長方形とし、奥行方向弁別と形態（長方形の向き）弁別の課題が実施された。その結果、閾値は奥行弁別の場合より形態弁別の場合の方が高かった。また、輝度差刺激より色差刺激の方が閾値が高く、その程度は形態弁別

の方が著しかった。これらの結果より、網膜像差に基づく奥行知覚が等輝度刺激では劣化すると結論された。また、奥行方向弁別より形態弁別の方が劣化が著しかったことから、ランダムドットステレオグラムによる奥行知覚の劣化は、局所的な網膜像差情報を補間して全体的な面を生成する処理の効率が等輝度条件下では低下することによると推論された。そして、過去の研究でランダムドットステレオグラムに関して報告された見えの奥行の消失は、奥行そのものというよりも周囲に対して奥行を持つ形の知覚の劣化を反映している可能性が指摘された。また、等輝度条件での知覚の劣化が奥行弁別と形態弁別とで異なることから、色収差の影響が否定された。

１－２－２　奥行知覚の維持の報告

しかし、等輝度条件下でも輝度差がある場合とほぼ同等の奥行知覚が生じるとする報告もある。

de Weert & Sadza (1983)は、コンピュータディスプレイ上にステレオグラムを提示し、4枚の鏡から成るステレオスコープを通して観察させた。観察距離は2.5m であった。ステレオグラムは縦2.7′横3.6′の要素で構成された一辺3°の正方形で、中央の縦43.2′横57.6′の長方形の領域に±3.6′の網膜像差が与えられた。要素の色は赤（色度はx=0.654、y=0.341）、緑（x=0.285、y=0.606）、黄（x=0.436、y=0.521）のうちの2色で、ステレオグラムの周囲6°四方は白色（x=0.300、y=0.246、）であった。上記の3色それぞれについて交照法によって白色（輝度は37cd/m²）と等輝度になる値が求められ、組み合わされる2色の一方はその輝度に固定された。もう一方の色の輝度は等輝度値とその上下10段

階（コントラストで±20%の範囲）に設定された。また、色が同じで輝度の異なる要素からなるステレオグラムも用いられた。被験者は、0.5秒間刺激を観察し、長方形が周囲から浮き出て見えたか、沈んで見えたかを報告した。

同色条件では、コントラストが10%以下になると網膜像差と見えの奥行との方向の一致率が急激に低下したが、異色条件ではコントラストに関わりなく一致率はほぼ100%であった。しかし、2種類のステレオグラムを同時に提示し、見えの奥行の鮮明さを比較させた場合には、輝度差が大きいほど見えの奥行は鮮明になる傾向が見られた。色の組合せによる差違も見られ、赤－緑の場合が最も鮮明で、次が赤－黄、黄－緑が最も不鮮明であった。また、より困難な課題として、四隅のどこか一ヶ所が欠けた長方形が浮き出て見えるステレオグラムを用い、欠けている場所を判断させた。その結果、全体的に一致率が低下したが、傾向は変わらなかった。彼らは、これらの結果と立体視の消失を示した先行研究との差異は判断課題の難度の違いによると推測した。すなわち、先行研究での立体視の消失は、自分たちよりもずっと困難な課題を用いたことによるとした。また、色消しレンズを通して観察した場合でも結果の傾向が変わらないことから、眼の色収差に起因する輝度差が立体視を引き起こしている可能性を疑問視した。

Grinberg & Williams (1985)は、従来の赤－緑の等輝度刺激では眼の色収差によって意図しない輝度差が生じる可能性を完全には除去できないと考えた。そこで、S錐体からのみ入力を受け、明るさ感覚には関与しない色覚機構（彼らはblue-sensitive mechanismと呼んでいる）によってのみ検出されると考えられる刺激を用いた。それは、高輝度で一様な黄の背景上に低輝度の菫の図形を重ねたものであった。この刺激では、

明るさ感覚に関与するLおよびM錐体は、高輝度の黄背景光によって高い活性状態におかれるため、弱い菫色の図形を検出できない。そのため、視覚系にとっては明るさが均一で色差のみによって作られたパタンと同じことになる。したがって、この刺激でも立体視が生じるならば、色情報単独での立体視への寄与が結論できると考えられた。

装置は図３－１４のようなマクスウェル視光学系であった。刺激図形（図形の部分が透明なフィルム、図中のTを背後から照明することで作り出される）は右眼には直接、左眼にはその鏡映像が提示された。背景は直径14.0°または7.1°の円形で、波長は580nm、網膜照度は840tdであった。菫色部の波長は440または480nm、網膜照度は3または1.5td（パタン検出閾値より1log単位明るい）であった。ステレオグラムは大きさ20′（解像力の低い青機構でも検出可能な大きさ）の要素33×33個から成り、中央の15×15の部分に20′の交差または非交差網膜像差が与えられた。刺激は10秒間提示され、被験者は中央の正方形が周囲から浮き出て見えるか、沈んで見えるかを報告した。

奥行が不鮮明との報告もあったが、2名の被験者における見えの奥行方向と網膜像差の方向との一致率は94%と100%であった。この結果から、彼らは、立体視機構は色情報を利用できると結論した。また、立体視の劣化を報告した従来の研究については、視覚系の等輝度刺激に対する解像力の低さに比べて用いた刺激が細かすぎた可能性や、L錐体とM錐体の分光感度が重複しているため、赤と緑の刺激では立体視機構を駆動するのに十分なだけの色コントラストが得られなかった可能性を指摘した。

Isono & Yasuda (1988)は、コンピュータで制御されたCRTディスプレイ上に赤－緑、黄－青、白－黒の要素の組合せからなるランダムドットステレオグラムを提示した。ステレオグラムの平均輝度は150cd/m²で、

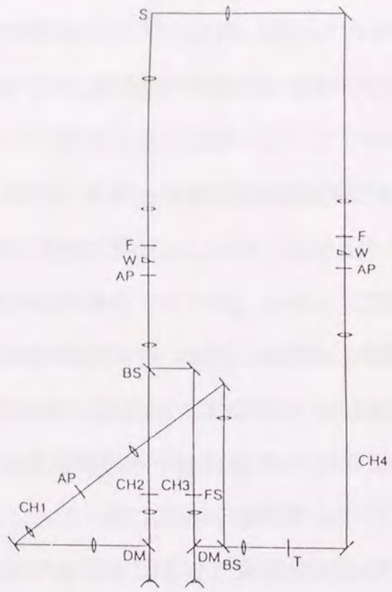


図３－１４　Grinberg & Williams (1985)の実験装置の略図

赤と緑、黄と青の明るさについては交照法で等輝度に設定された。ステレオグラムは15.5°×11.4°の大きさで、中央の2°四方の領域に交差網膜像差が与えられた。左右の眼の前に置かれた液晶シャッターを各々60 Hz で交互に開閉し、それに同期させて左眼または右眼用のステレオグラムが提示された。そして、被験者に、奥行が見える、奥行は見えるが不安定、奥行が見えない、のいずれかを報告させ、融合閾が測定された。融合閾は有彩色の条件で約25′、白－黒条件で約40′となった。そして、色情報が両眼立体視機構によって利用されていると結論された。Lu & Fender (1972)などの報告との不一致については、等輝度の設定方法の差違を指摘しているだけで、詳しい議論はなされていない。

Scharff & Geisler (1992)は、色消しレンズを用いずに、眼球の色収差の影響を検討した。彼らは、色収差によって生じる輝度差部分が高い空間周波成分として発生することに着目し、刺激をぼかして高周波成分を除去することによって、色収差の影響を取り除くことを試みた。

ステレオグラムはコンピュータディスプレイ上に提示され、4枚の鏡で構成されたステレオスコープを通して観察された。観察距離は45cm であった。ぼかす前のステレオグラムは16′の要素からなる一辺約8.5°の正方形で、その中央の一辺48′の正方形部分に16′の交差または非交差網膜像差が与えられた。ステレオグラムは、輝度変化に関して同位相または逆位相の赤と緑（ディスプレイの赤および緑蛍光体単独の発色による）のドットパタンを重ね合わせて作られた。同位相では要素が全て黄色で輝度が異なった。逆位相では要素間で色が異なり、輝度が等しい場合と異なる場合とがあった。平均輝度は10cd/m^{2}であった。そして、色収差によって発生しうる最大の輝度変化を理論的に予測し、そのような輝度変動を打ち消しうるフィルター操作を刺激パタンに加えた。比較の

ために、フィルターをかけない刺激も用いられた。被験者は、0.2秒間観察し、中央部の正方形が周囲から浮き出して見えるか、沈んで見えるかを報告した。そして、階段法の手続で、立体視のコントラスト（赤および緑の輝度の要素間での変化幅）閾値が求められた。

得られた閾値は逆位相・等輝度の条件で最も高かったが、立体視が失われることはなかった。しかも、閾値を理論的に錐体レベルでの出力差（3種の錐体の合計。彼らはequivalent luminance contrastと呼んでいる）に換算すると、3名の被験者中2名において、同位相のでの閾値とほぼ等しかった。ただし、1名については逆位相・等輝度の条件の方が高くなった。この結果に基づき、色情報と明るさ情報は同一の立体視機構によって同じように利用されており、両情報の効率に違いがあるとしても、その起源が視覚系のより低次レベルでの刺激に対する反応効率の差違にある可能性が指摘された。また、得られた閾値は、像をぼかした場合とそうでない場合とで大差はなかった。しかも、理論的に予測された色収差に基づく輝度コントラストよりもはるかに大きかった。これらより、色収差による輝度差は等輝度刺激での両眼立体視にほとんど寄与していないと結論された。

Stuart, Edwards, & Cook (1992)は、両眼に提示するステレオグラム間の対応する要素の色を変えた場合に、立体視の潜時が変化するかどうかを調べ、色情報の立体視への寄与を検討した。大きさが9.12′×7.61′で、白色（x=0.313、y=0.329）背景上の赤（x=0.488、y=0.361）または緑（x=0.280、y=0.605）の要素からなる4.56°×3.80°の大きさのステレオグラムがコンピュータディスプレイ上に提示され、鏡式のステレオスコープを通して観察された。ステレオグラム中央の20要素四方の領域の右または左半分に2要素、残りの半分に1要素分の交差視差が

与えられた。被験者の課題は、右または左のどちらの長方形がより近く見えるかを判断することであった。白色部（背景）の輝度は37.1cd/m²であった。赤要素は41.6または31.9cd/m²、緑要素は41.7または31.8 cd/m²で、これらの輝度のコントラストは13.3%であった。また、等輝度の赤と緑の色差は、equivalent luminance contrastに換算すると、14.6%であった。両眼のステレオグラムの対応する要素の一部が、互いに輝度、色、または輝度と色の両方が異なるようにされた。

その結果、いずれの条件でも属性の一致しない要素の数が増すにつれて潜時が増加した。そして、その数が全体の50%に達すると、色と輝度の両方が不一致の場合は、立体視が成立しなくなった。輝度が一致で色が不一致の場合も、6名の被験者中5名が同様の結果を示した。しかし、輝度が不一致で色が一致している場合は全員が立体視可能であった。これより、色情報は立体視に十分寄与していると結論された。また、P系M系ともに立体視に関与しているが、担う側面が異なる、たとえばP系は色差で構成されたランダムドットステレオグラムによる立体視などに、M系は網膜像差の連続的変化による奥行運動の知覚などに関与している可能性が指摘された。

Li & Guo (1995)は、コンピュータディスプレイ上に、赤と緑の蛍光体のみを発光させて、大きさ1′の要素から成る一辺2.5°の正方形のステレオグラムを提示した。ある色の要素の平均密度は1°当たり26個であった。ステレオグラム中央部の上下左右いずれかを向いたU字型の領域が、正方形の縁に対して1～28′の交差網膜像差を与えられた。緑（色度座標はx=0.31、y=0.57）の要素の輝度は8.6cd/m²に固定し、交照法で緑と等輝度になるように赤（x=0.60、y=0.35）の要素の輝度を決定した。また、比較のために、同じ色でマイケルソンコントラストが0.6の要

素から成るステレオグラムも用いられた。被験者の課題は、57cmの距離から観察して、奥行が見えたらU字の向きを報告することであり、恒常法の手続で網膜像差に関する絶対閾値が求められた。

3名の被験者は、等輝度でも見えの奥行と正しい形を報告し、閾値は輝度差がある条件と差がなかった。また、同色条件でコントラストを0.1から上昇させた場合、0.1のコントラストでも約10′の視差で立体視が可能であり、コントラストの上昇にともなって閾値は減少したが、0.3以上ではほぼ一定（2′以下）であった。そして、等輝度刺激でも立体視が可能であることからPB系の寄与が、比較的低い輝度コントラストで立体視が可能であることからM系の寄与が推測された。

一方、Schiller, Logothetis, & Charles (1990)は、等輝度刺激を用いるのではなく、サルの外側膝状体のP層やM層の一部を破壊した場合の知覚機能の変化を調べることで、これらの神経経路と奥行知覚との関係を調べた。7匹のリーサスサルが、特定の視覚対象が現れたら、そちらへ視線を移すように訓練された後、薬品による処置を受けた。その後、まず微小な刺激を用い、視野内で処置の影響が見られる領域と影響のない領域が調べられた。そして、各領域に同じ刺激が提示され、注視反応（眼球運動）が比較された。ステレオグラムはコンピュータディスプレイとステレオスコープを用いて提示された。ステレオグラム内の小さな正方形の領域に6.6′～39.6′の視差が与えられ、注視対象とされた。正方形の位置は様々に変えられた。また、空間周波数が2.2c/degのものと4.5c/degのものが用意された。また、ステレオグラム内に異なる網膜像差を持つ複数の領域を作り、その内の特定の領域を注視させる課題も用いられた。

その結果、M層の処置は立体視に全く影響を与えなかった。P層の処

置は高空間周波数の、すなわち目の細かいステレオグラムに対する立体視を著しく損なったが、低空間周波数の刺激の場合の影響はわずかであった。この結果から、両眼立体視機構はP、M両系路にまたがって存在し、高空間周波数の網膜像差情報はもっぱらP経路で伝達されていると結論された。

1－2－3　まとめ

等輝度のランダムドットステレオグラムによる奥行知覚に関する諸研究の結果は、おおよそ以下のようにまとめられよう。

（1）等輝度で奥行知覚が消失あるいは劣化するという研究と維持されるという研究とが相半ばし、判断課題や輝度差の条件などによって結果が異なる。

（2）奥行の有無や奥行方向の判断をさせる場合より、奥行量や形態の判断をさせる場合の方が、等輝度条件での劣化が見出されやすい（Kingdom et al., 1999; de Weert & Sadza, 1983）。

（3）要素間の輝度差を細かく変化させると、奥行の知覚されない輝度差条件が見つかる（Lu & Fender, 1972; de Weert, 1979）。

（4）奥行の知覚されない輝度差条件や奥行知覚の鮮明さは刺激を構成する色の組合せによって異なる（Lu & Fender, 1972; de Weert, 1979; de Weert & Sadza, 1983）。

（5）要素間の対応づけに関しては色情報が利用されている（Stuart et al., 1992）。

（6）色情報の有効性に関して個人差がある（Scharff & Geisler, 1992）。

（7）等輝度条件下の奥行知覚は色収差によるものではない（Grinberg & Williams, 1985; Kingdom et al., 1999; Scharff & Geisler, 1992; de Weert & Sadza, 1983）。

1－3　等輝度図形ステレオグラムによる両眼立体視

1－3－1　奥行知覚の維持の報告

図形ステレオグラムによる奥行知覚に関しては、等輝度条件でも輝度差がある条件と同様に維持されるという報告が多い。

たとえば、Ramachandran, Rao, & Vidyasagar (1973)は、赤い正方形の背景と背景に対して交差視差を持つ緑の菱形というステレオグラム（立体視が成立すれば菱形が背景から浮き出して見える）を用い、背景の明るさを固定して緑部分の明るさを変化させたが、3名の被験者のだれも、いかなる明るさにおいても見えの奥行の消失を報告しなかった。また、Gregory(1977)も、線図形のステレオグラムでは、等輝度でやや不安定になるものの、見えの奥行は常に維持されていたと報告した。

Comerford (1974)は、図３－１３に示されたものと類似の光学系を用い、一辺3° 20′の正方形の背景上に直径55′の車輪を描いたステレオグラムを提示した。車輪は正方形に対して7′の交差または非交差網膜像差を持っていた。背景の輝度は固定され、車輪の輝度は、MDB法で決定された背景と等輝度の値を中心に、その上下に3段階設定された。背景と車輪の色の組合せは白背景に対して赤、緑、青、白の4色、緑背景に対して赤と青の2色であった。被験者は1.75mm径の人工瞳孔と眼の色収差を補正するための色消しレンズを通して0.5秒間観察し、車輪が背景の前

に見えるか、後ろに見えるかを報告した。

その結果、背景と車輪の色が異なる場合は、網膜像差方向と見えの奥行方向との一致率が、等輝度を含む全ての輝度条件でチャンスレベルを超えており、多くの色の組合せにおいて輝度差にかかわらずほぼ一定であった。しかも、輝度差が同じ条件では白色同士の組合せより高かった。ただし、背景と車輪の色の組合せによって一致率が異なった。この結果については、ステレオグラムを構成する各領域の彩度や色相の組合せによって、領域間の境界の明瞭さが異なり、境界が不明瞭なほど立体視の精度が下がることによると解釈された。また、図形は見えても奥行が感じられない場合があることから、両眼立体視の成立には形態知覚の成立に必要な値以上の境界の明瞭さが必要であると推論された。

de Weert(1979) は、先に述べた方法で、13.5′または33.6′の網膜像差を持つ2本の垂直線分から成るステレオグラムについても実験を行った。線分の輝度を固定し、背景の相対輝度を変化させたところ、どの条件においても立体視は成立した。この結果から、色差の情報は輝度差の情報とは独立に局所的立体視に寄与しうると推論された。

de Weert & Sadza (1983)は、先に述べた方法で、3° 四方の背景上に2個の環を上下に並んでおり、両者の間に±3.6′の網膜像差があるステレオグラムを提示した。被験者の課題はどちらの環がより近く見えるかを判断することであった。その結果、異色条件では背景と環の輝度差に関わりなく、網膜像差と見えの奥行との方向の一致率はほぼ100%であった。ただし、見えの奥行は等輝度の条件で最も不鮮明であった。

Grinberg & Williams (1985)は、先述の装置で、幅10′高さ1.7° の線分3本が横に並ぶ（両端の線分間は2.8° ）ステレオグラムを提示した。被験者は5秒間観察して、中央の線分が両側の線分の前に見えるか後ろに

見えるかを判断した。中央の線分が両側の線分に対して持つ交差または非交差の網膜像差を変化させ、階段法によって立体視の閾値を求めた。2名の被験者について線分の種々の明るさで得られた閾値に指数関数を当てはめて求めた収束値は36″と45″であった。この値は、背景が暗黒で明るさ差が存在するステレオグラムでの閾値（7″および3″）よりずっと高かった。この結果から、青機構を通じて立体視は、可能であるが、明るさ機構を通じての立体視よりはるかに効率が悪いと結論された。しかし、菫色部の明るさはパタン検出の閾値より1log単位程度高いだけであった。そこで、明るさの差違を含むステレオグラムについても、図形の背景に対するコントラストを低くして、パタン検出閾の1log単位程度にすると、立体視の閾値は大幅に上昇した（28″と29″）。この結果から、等輝度刺激で立体視力が悪かったのは、青機構からの入力の立体視機構での利用効率が低いからではなく、青機構のコントラスト感度が低いために図形あるいは境界が不鮮明である、すなわち入力そのものが弱いことによると解釈された。

Jordan, Geisler, & Bovik (1990)は、立体視の基盤である両眼間の刺激要素の対応づけに色情報が寄与するかどうかを検討した。ステレオグラムは、幅4′の縦長の長方形を40′の間隔（長方形の中央間の間隔）で多数横に並べ、そのような列を縦に3列並べたものであった。長方形の高さは中央の列では32′、上下の列では40′であった。中央の列は網膜像差がなく、上下の列は中央の列に対して大きさが同じで逆方向の網膜像差を持っていた。この刺激に対して立体視が成立すると、一方の列は中央の列に対して前に、他方は後ろに見えた。ただし、各列の要素は全て同じ形であるので、一方の眼のステレオグラムの各長方形は他方の眼のステレオグラムの隣り合った2個の長方形と対応可能（交差と非交差の両

方の網膜像差が発生可能）であった。しかし、長方形の色や明るさが全て同一ならば、より網膜像差の小さな長方形と対応づけがなされた。すなわち、その網膜像差に応じた奥行が知覚された。被験者は、45cmの距離から2秒間観察し、三つの列の見えの距離の順序を報告した。極限法または恒常法によって、その順序が逆転する網膜像差が求められた。その値は、色や明るさが同一ならば、長方形の間隔の1/2（20′）になると考えられた。

まず、背景が黒、中央の列は14cd/m^{2}の黄、上下の列は輝度が7、14、21cd/m^{2}のいずれかの赤（x=0.63、y=0.34）または緑（x=0.31、y=0.595）のステレオグラムが用いられた。上下の列の長方形が全て同じ色と輝度の条件では、見えの奥行方向が逆転する網膜像差は平均17.1′で、輝度は一定で緑と赤の長方形が交互に並ぶ条件では、平均27.5′であった。これにより、色情報が立体視における要素間の対応づけに有効であることが示された。

次ぎに、背景に対する長方形の輝度コントラストの符号が逆の緑および赤のパタンを重ね合わせて作られたステレオグラムが用いられた。背景の輝度は14cd/m^{2}で、中央の列の長方形は黒、上下の列の長方形は種々の色合いで全て同一の色と明るさを持っていた。網膜像差は8′で、被験者の課題は3列の見えの距離順序を報告することであった。そして、赤および緑のパタンにおける背景－長方形間の輝度コントラストを変え、網膜像差方向と見えの奥行方向の一致率が70%になる閾値を求めた。その結果、赤または緑パタンにのみコントラストが存在する条件（背景と長方形は色が同じで輝度のみ異なる）よりも、両パタンに等量のコントラストが存在する条件（背景と長方形は輝度が同じで色のみ異なる）の方が、閾値は高かった。しかし、equivalent luminance contrastに換算

すると両条件の閾値はほぼ同程度であった。このことから、上記の課題における色情報の有効性の低さは等輝度刺激に対する受容器レベルでの反応効率の低さによるものであり、色情報と明るさ情報は立体視機構によって同程度の効率で利用されていると結論された。

また、Baumann (1994)は、領域間の色度差の効果を検討した。色紙を用いて、背景とマンセルバリュウーが等しく色度が異なる3本の垂直線分からなるステレオグラムを作成した。そして、両端の線分に対する中央の線分の位置を変え、一方の眼には直接、他方の眼には左右を反転させるプリズムを通して提示することで、10′の交差または非交差の網膜像差を作り出した。被験者は中央の線分が両側の線分の前に見えるか後ろに見えるかを報告した。その結果、報告された奥行方向と網膜像差方向との一致率は、背景と線分との色度の差違が増すにつれて増加した。また、Baumann (1997)は、同様な実験をコンピュータディスプレイとステレオスコープを用いて行い、眼球の色収差の補正を行う場合とそうでない場合とで結果に差がないことを報告した。

１－３－２　奥行知覚の劣化の報告

しかし、奥行知覚の消失には至らないまでも劣化することを報告した研究もある。

Osuobeni & O'Leary (1986)は、de Weert (1979) や Comerford (1974)と同様な方法で、幅5.2′高さ20′の線分2本が左右に並んだステレオグラムを提示した。左眼に提示される線分の間隔を32′に固定し、右眼の線分の間隔を変化させて両眼網膜像差を与え、立体視の閾値を求めた。背景は2.71cd/m^{2}の緑色であった。被験者は色立体視（第２章を参照）

が生じないように位置を調整された直径2.8mm の人工瞳孔を通して観察した。観察距離は66cm であった。まず、2本の線分が暗黒である条件と背景と等輝度（輝度計で測定）の赤である条件について、被験者に前後関係を判断させ、恒常法の手続で閾値が求められた。7名の被験者の平均値は、輝度差がある場合で25″、等輝度の場合で75″であった。

次ぎに、線分を赤または緑とし、背景とのコントラストを等輝度を挟む10段階に設定した。被験者の課題は、2本の線分が等距離に見えるように、右眼に提示された線分の間隔を調整することであった。そして、40の測定値の標準偏差が閾の測度として求められた。背景と線分が異色の場合、等輝度近辺のコントラストで閾値が上昇した（図３－１５を参照）。ただし、閾値がピークになるコントラストは、被験者によって異なり、必ずしも設定した等輝度条件ではなかった。また、コントラストレベルが同じなら、背景と線分が異色の条件より同色の条件の方が閾値が低くなる傾向が見られた。彼らは、この結果と眼球の色収差の影響を抑える人工瞳孔を用いたことから、等輝度での立体視は色収差の生み出す輝度差が原因であるという可能性を疑問視した。また、水晶体の調節を麻痺させピント合わせに補正レンズを用いた場合でも同様な結果が得られたことから、奥行知覚の劣化は等輝度条件での調節機能の劣化によるものではないとした。そして、等輝度での境界の不明瞭さが原因である可能性を指摘した。

また、Osuobeni (1991)は、眼球の色収差の影響をさらに検討するため、色消しレンズを用いた補足実験を行った。方法は Osuobeni & O'Leary (1986)の2番目の実験と同じであった。結果の傾向は先の実験と同じであり、色消しレンズを通して観察しても、統計的に有意な差違は現れなかった。この結果から、彼は色収差の影響を否定した。

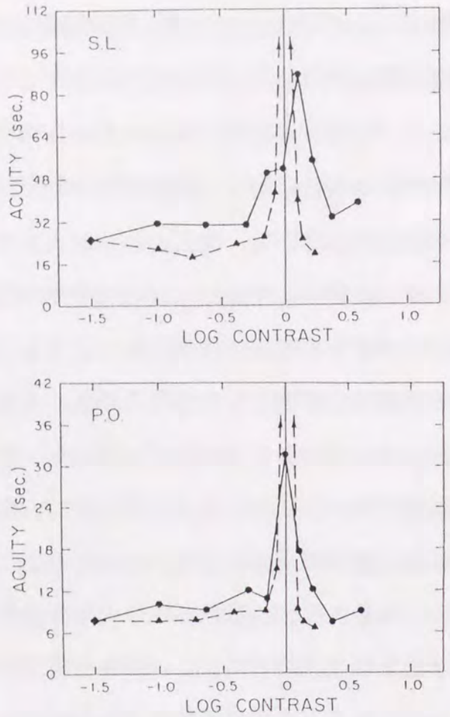


Fig. 4.

Fig. 5.

図３－１５　Osuobeni & O'Leary (1986)の実験結果（被験者2名）。横軸は対象と背景のコントラストを表す。0が等輝度で、プラスは対象の方が背景より明るいこと、マイナスはより暗いことを示す。縦軸は網膜像差の閾値を表す。丸印は対象と背景の色が異なる条件、三角印は同色の条件である。

Simmons & Kingdom (1994, 1995)は、色情報を利用する両眼立体視機構と輝度情報を利用する両眼立体視機構との機能的な差違、特に網膜像差の大きさに対する感度の差違を調べた。また、輝度差パタンの検出機構と輝度差に基づく立体視機構が同一の機能的性質を示すという知見に基づき、色差パタンの検出機構と色差に基づく立体視機構との関係も同様であるかどうかを検討した。

彼らは、色または輝度の正弦波状の変化にある数学的変換を施して得られる、Gaborパタンと呼ばれる縦縞（図３－１６を参照）をCRTディスプレイ上に提示した。その平均輝度は2cd/m^2、空間周波数は0.5 c/degであった。Gaborパタンの周囲には半径3°の白色（10cd/m^2）の環が提示され、Gaborパタンには環に対して3′～60′の交差または非交差網膜像差が与えられた。左右の眼の前に置かれた液晶シャッターを各々80Hzで交互に開閉し、それに同期させて左眼または右眼用のステレオグラムを提示した。赤（x=0.614、y=0.347）または緑（x=0.270、y=0.594）のパタンを同位相で重ねて輝度差刺激を作り、等輝度かつ逆位相で重ねて色差刺激を作った。等輝度は、赤と緑を逆位相で重ねた正弦波パタンを動かし、見えの速さが最低となる両色の輝度比として定義された。ステレオグラムは、1秒の間をおいて2回ある提示機会のどちらに、0.2秒間提示された。立体視課題では、被験者は114cmの距離から両眼で観察し、Gaborパタンが環より前に見えたか後ろに見えたかを報告した。パタン検出課題では、単眼で観察し、Gaborパタンが提示されたのは2回の機会のどちらであったを報告した。そして、恒常法の手続で、立体視またはパタン検出に関する、色または輝度のコントラスト閾値が求められた。

その結果、10′以上の網膜像差の場合、網膜像差とコントラスト閾と

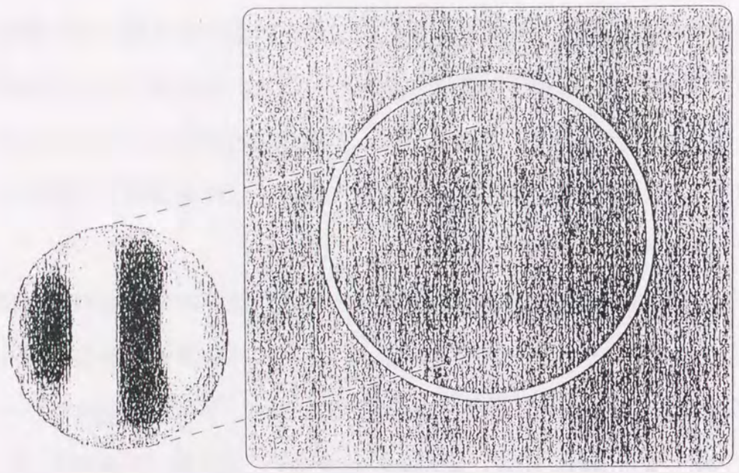


図３－１６　Gabor パタン（Kingdom & Simmons, 1996）

の関係は輝度差刺激と色差刺激とで大きな違いがなかった。しかし、輝度差刺激では、網膜像差が30′～40′の場合に得られる閾値の最小値がパタン検出閾値とほぼ同じであるのに対して、色差刺激ではパタン検出閾値より高かった。また、色差刺激の場合、網膜像差3′では立体視が不可能であった。これらの結果より、まず、網膜像差がある程度大きければ、等輝度でも立体視は可能であるが、輝度差がある場合に比べて劣化することが確認された。また、色情報を利用する両眼立体視機構と輝度情報を利用する両眼立体視機構とは、感度を別にして、働き方が似ていること、したがって両者が単一の機構という可能性のあることが示唆された。さらに、輝度差に関してはパタン検出機構の全てが立体視機構に入力しているが、色差に関しては一部しか入力していない可能性が推測された。また、立体視の消失を報告した過去の研究については、用いられた刺激が今回の刺激よりもずっと高い空間周波数成分を含んでおり、色差情報の処理機構は高空間周波数情報に対して感度が低いことが原因である可能性が示唆された。

Kingdom & Simmons (1996)は、刺激のコントラストと立体視力（網膜像差の閾値）との関係について、色情報を利用する両眼立体視機構と輝度情報を利用する両眼立体視機構との差違を検討した。ただし、パタン検出効率の差が立体視機構の差と混同されるのを防ぐため、刺激のコントラストをパタン検出の閾値に対する比で定義した。

装置や刺激は先に述べたものとほぼ同じであったが、赤と緑の等輝度は立体視力が最も低下する輝度比で定義された。その結果、輝度差刺激、色差刺激ともにコントラストが上がるほど立体視力は高くなった。しかし、コントラストにともなう立体視力の上昇は輝度差刺激の方が急激であった。また、同じコントラストなら、輝度差刺激の方が立体視力は高

かった（パタン検出閾値の10倍のコントラストの条件で4～9倍良い）。これらの結果より、色差のみの刺激でも両眼立体視が可能であるが、輝度差がある場合より劣化することが再確認された。そして、その劣化は視覚系の低次レベル（たとえば錐体）での反応効率の低さによるものではないと結論された。また、色情報と輝度情報の両方を利用できる単一の立体視機構があるのではなく、それぞれの情報に特殊化した別個の立体視機構が存在する可能性も示唆された。

Simmons & Kingdom (1997)は、色情報が輝度情報と独立に立体視に寄与しているのか、それとも完全には除去できない輝度情報による見かけの効果に過ぎないのかを検討した。そのために、立体視機構に関する2種のモデルを立て、それらに基づくコントラスト閾値に関する予測値と実測値との適合度を比較した。一つのモデルは、輝度コントラストに応答し、その効率（網膜像差方向の弁別精度）がコントラストの指数関数で定義されるような単一の機構を仮定するものであった。そして、色コントラストは機能的に等価な輝度コントラストに換算され、輝度コントラストに加算されると仮定された。もう一方のモデルは、輝度コントラストと色コントラストのそれぞれに応答する別個の機構が存在し、最終応答は両者の応答（各コントラストの指数関数）の加算で定義されると仮定するものであった。

実験方法は同じ著者たちの過去の研究とほぼ同じであった。ただし、赤と緑の等輝度は網膜像差方向（見えの奥行方向）の弁別が最も悪くなる輝度比で定義され、輝度差と色差の両方を含む刺激も用いられた。その結果、二重機構のモデルからの予測値の方が適合度は高かった。彼らは、さらに、色情報と輝度情報の立体視機構への入力について図３－１７のような四つのモデルを検討した。図中の（ａ）は、Livingstone &

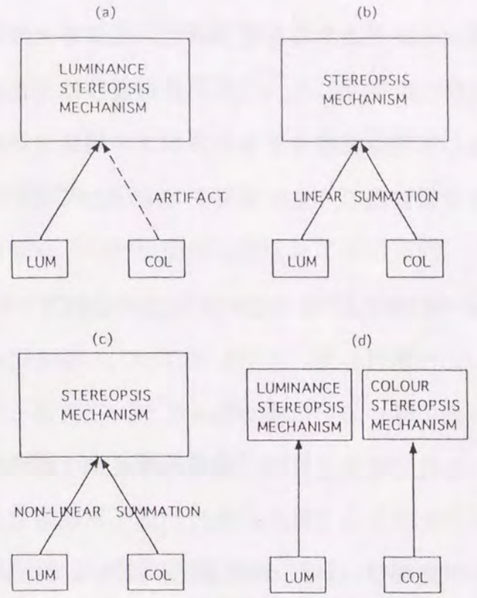


図３－１７　色情報と輝度情報の立体視機構への入力についてのモデル（Simmons & Kingdom, 1997）

Hubel が指摘したものであるが、単一機構モデルが等輝度刺激のデータに当てはまらなかったことから否定された。先の単一機構モデルと類似した（b）も同様に否定された。（c）の可能性は否定しきれなかったが、（d）すなわち二重機構モデルの方がより可能性が高いと主張された。そして、色情報に基づく立体視はP系によって担われていると推測された。

Kingdomet al. (1999)は、先に述べた方法で図形ステレオグラムによる立体視についても検討した。ステレオグラムの中央に一辺5.35°の正方形が、一番外側に幅1.34°の枠が描かれた。正方形と枠は同じ色で、両者の間は異なる色で埋められた。図形を描く赤と緑の等輝度は、ランダムドットステレオグラムで見えの奥行が最も不明瞭になる輝度比として定義された。被験者は、2回の刺激提示のどちらで指定された種類の奥行が感じられたか、または正方形が見えたかを報告した。そして、階段法の手続で、奥行方向弁別あるいはパタン検出に関する輝度または色のコントラスト閾値が求められた。その結果、パタン検出閾値に対する比で表された奥行弁別の閾値は輝度差刺激より色差刺激の方が高かった。しかも、その程度はランダムドットステレオグラムの場合と差がなかった。そして、網膜像差に基づく奥行知覚が等輝度刺激では劣化し、その程度はステレオグラムの種類によらないと結論された。

1－3－3　まとめ

等輝度の図形ステレオグラムによる奥行知覚に関する諸研究の結果は、以下のようにまとめられる。

（1）奥行知覚の消失を報告した研究は、Livingstone & Hubel (1987, 1988)以外にはない。

（2）ただし、奥行知覚は等輝度でも維持されるが、輝度差がある場合に比べて劣化するという報告がある。

（3）奥行知覚の精度は刺激を構成する色の組合せによって異なる（Baumann, 1994; Comerford, 1974）。

（4）等輝度条件下の奥行知覚は色収差によるものではない（Baumann, 1997; Grinberg & Williams, 1985; Osuobeni, 1991; de Weert & Sadza, 1983）。

1－4　等輝度刺激による単眼性奥行知覚

絵画的奥行手がかりや運動視差に関しては、Livingstone & Hubel (1987, 1988)の主張と一致しない、奥行知覚が等輝度でも維持されるという報告がほとんどである。

たとえば、Troscianko et al. (1991)は、第2章で紹介した方法を用い、きめの勾配の手がかりが等輝度刺激においても有効であることを示した。刺激は白背景上に赤い正方形を多数配置したものであったが、正方形の大きさを画面の下部から上部に向けて徐々に小さくした。また、正方形の配列が規則的な条件（線遠近法手がかりを含む）と不規則な条件とが設定された。正方形の輝度は、背景と等輝度あるいは±5～20%の輝度コントラストを持つように設定された。刺激パタンの見えの傾き（上部が奥に傾いて見える）は正方形の輝度条件に関わりなく一定であった。また、正方形も白色の場合は、同程度の見えの傾きを生じるためには、背景との間に約30%のコントラストが必要であった。眼の色収差などによって刺激パタン内に発生しうる輝度コントラストは4%程度であるの

で、等輝度条件での見えの奥行はそのようなアーティファクトによるものではなく、きめの勾配手がかりに基づく奥行知覚機構は色情報（色差に基づく境界情報）を利用しうると結論された。

Cavanagh(1987)は等輝度刺激における重なりの手がかりの有効性を報告した。彼は、図３－１８のような線図形を赤背景上にそれと等輝度の緑で描いたが、被験者は、2枚の正方形の前後の重なりという見えが白黒パタンと同様に維持された、と報告した。一方、Put & de Weert (1997)は、水平の長方形の上に垂直の長方形が重なった刺激パタンを等輝度で描いた場合に、単一の水平長方形ではなく2個の分離した長方形が知覚されたことから、等輝度条件下では重なりの手がかりが働かないと推測した。

Cavanagh, Sida, & Rivest (1995)は、運動視差による奥行知覚が等輝度刺激でも可能かどうかを検討した。彼らは、コンピュータディスプレイ上に、水平方向に色または輝度が正弦波状に変化する帯を縦に4列並べた刺激パタンを提示した。刺激パタンは画面の8°四方の範囲を埋めていた。各帯は0.5c/deg の輝度の変化する赤（x=0.6084、y=0.3479）および緑（x=0.3479、y=0.2490）の正弦波パタンを同位相または逆位相で重ね合わせて作られた。平均輝度は26cd/m^2 であり、同位相の場合は色が黄色で輝度が変化するパタン、逆位相の場合は輝度と色が同時に変化するパタンとなった。また、逆位相で赤と緑の輝度変化の振幅が等しい場合は輝度が一定で色のみ変化するパタンとなった。観察者は、75 cm の距離から単眼で観察し、頭を約17.5cm/sec の速さで左右にほぼ一定の距離動かした。すると、頭の動きに同期して刺激パタンの縞が右または左に動いた。その際、上から1番目と3番目の縞および2番目と4番目の縞が対になって、互いに逆方向に動いた。その動きは、縞の対同士の

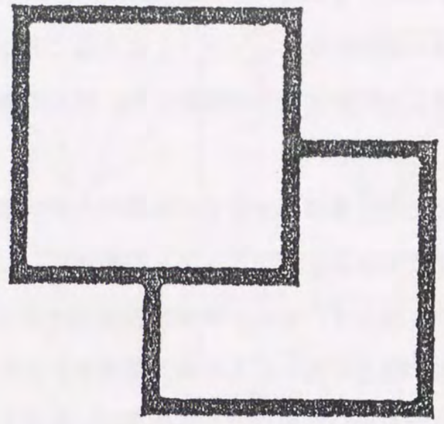


図３－１８　Cavanagh (1987)の重なり図形

間に1cm の奥行があり、それを75cm の距離から頭を動かしながら観察した場合の網膜像の動きをシミュレートしたものであった。被験者は、奥行がはっきり感じられたところで頭を止め、見えの奥行量を画面上の線分の長さで示した。

その結果、見えの奥行量は輝度変化の振幅が大きいほど大きく、等輝度の条件で最も小さくなった（図３－１９を参照）。しかし、等輝度でも見えの奥行はなくならず、また、輝度の振幅が大きいと、色の変化がある場合より、ない場合の方が見えの奥行量が多かった。これらより、色情報は効率はかなり低いが単独でも運動視差に基づく奥行知覚を生じることができ、それは意図せざる輝度情報によるものではないと結論された。そして、Livingstone & Hubel の報告については、用いられた刺激が細い線分であったため、等輝度での解像力の低下から、刺激が見えにくかったのではないかと推測した。

また、Ingling & Grigsby (1990)は、絵画的奥行手がかりによる奥行知覚が必ずしもM 経路に依存しないことを、等輝度刺激の替わりに残像を利用する実験で示した。彼らは、一般にM 系の神経細胞は一過型、P 系の細胞は持続型の応答を示すことや静止網膜像での視力の高さから、静止網膜像や残像のような時間的な変化のない刺激に対する知覚はP 系が担っていると仮定した。彼らは、透過光で暗黒中に描かれた図３－６に似た図形を Maxwell 視で0.25秒間提示した。線分の明るさ（網膜照度）は10Mtd であった。この刺激により陽性残像が10分程度持続したが、被験者はその期間中の様々な時点で、奥行感や円筒の見えの大きさについて報告した。その結果、通常の観察の場合と同様な奥行や円筒間の大きさの差違が安定的に知覚された。また、眼球運動や瞬きによって、残像の明瞭さが回復することはあったが、奥行や大きさの印象は変化し

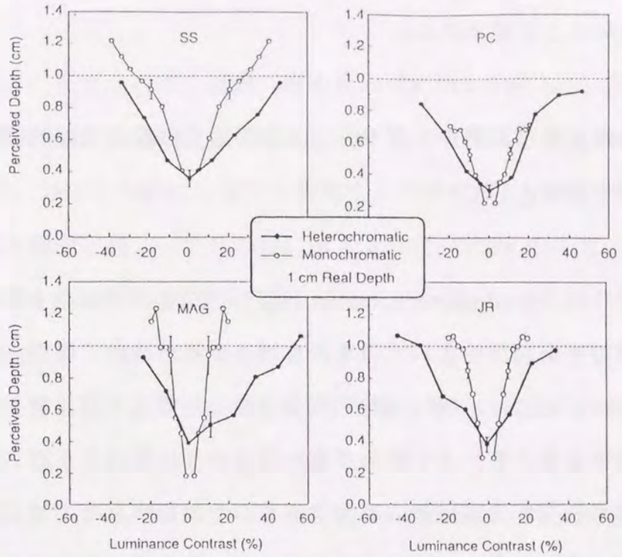


図３－１９　Cavanagh, Sida, & Rivest (1995)の実験結果

なかった。これらの結果より、P系が明るさの差違に基づく奥行の知覚に関与していると推論された。

第２節　等輝度図形ステレオグラムによる両眼立体視の実験的検討１ －反応時間を指標として－

上記のように、Livingstone & Hubel (1987)の広範で大胆な主張は様々な点で修正を余儀なくされているようにみえる。特に、等輝度の図形ステレオグラムにおける奥行知覚の完全な消失については、彼らの報告が唯一の例であり、きわめて旗色が悪い（１－３－３のまとめ（１））。ただし、他の研究との不一致の原因は明らかではない。そこで、この問題についてさらに詳細なデータを得るべく、一連の実験を行った。

Livingstone & Hubel (1987)が指摘している等輝度設定に関する問題点を考慮して、刺激をできるだけ小さくした。また、判断課題の種類や困難度によって結果が異なる可能性（１－２－３のまとめ（２）や（３））があるので、心的過程の差違・変化に敏感な指標として知覚や認知の研究でしばしば用いられる反応時間を指標として採用することにした。本研究の領域では、従来、この指標が用いられたことはほとんどない。眼球の色収差については、その影響のきわめて小さいことが報告されている（１－２－３のまとめ（７）および１－３－３のまとめ（４））ので、色消しレンズを用いるなどの補正は行わなかった。なお、以下の実験１は江草・御領（1993）において実験１として報告されたものである。

２－１　実験１

方法

被験者　正常な色覚、視力（裸眼視力は両眼とも1.2）、立体視力を有する男性2名（HE、HT）と女性1名（MF）が被験者となった。HEは著者であり、HTとMFは心理学を専攻する大学生であった。

装置と刺激　図３－２０の左に示すような、500wのキセノンランプを光源とする2光路の光学系が用いられた。刺激は、2枚の白色塗料を塗った薄いアルミ板に色光を反射させることによって暗黒中に提示された。一方の反射面は、被験者から1.5mの距離にあり、白色の円盤（周りは黒）のほぼ中央に円形の穴を開けたもので、その穴を通して背後のもう１枚の反射面が見えるようになっていた。各反射面は別の光路によって照射された。したがって、被験者から見た刺激の形は２重円形で、内部円（直径は視角にして0.4°）の中心は外部円（直径1.1°）の中心より左または右に2.5′ずれていた（図３－２０の右を参照）。被験者は右眼では刺激を直接、左眼では直角プリズムを通して刺激の左右反転像を観察することによって立体視を得た。ただし、左右の輝度を一致させるため、右眼の前にはNDフィルターが置かれた。両眼視した場合、内部円は外部円に対して5′の交差および非交差網膜像差を持っていた。また、凝視位置を示すために４個の赤色発光ダイオードが刺激の中心から上下左右に1°離れた位置に置かれた。刺激光の波長の設定は干渉フィルターで行い、輝度はNDフィルターと回転NDウエッジで調節した。光の遮断は電動シャッターで行った。装置の制御および反応の種類や反応時間の計測、記録はコンピュータ（NEC製PC9801vm）によってなされた。

条件　外部環の波長は500nm、輝度は2.7cd/m^2。内部円の波長は630、580、480nmで、輝度は外部環に対する等輝度値を中心に、その

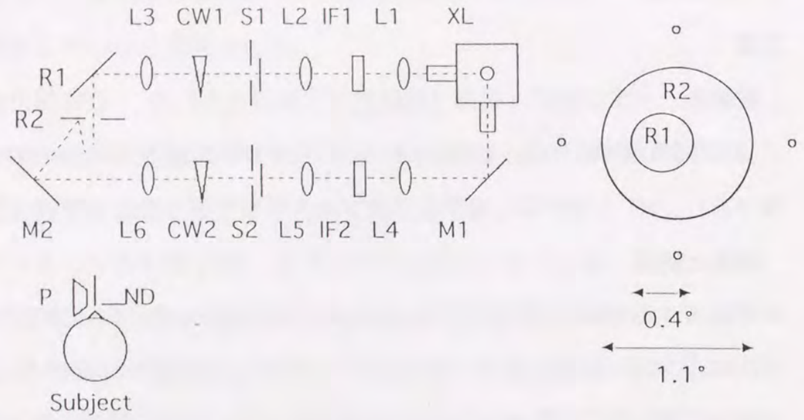


図３－２０　装置（左）および刺激パタン（右）の略図。左図のXLはキセノン光源、M1とM2は鏡、L1～L6はレンズ、S1とS2は電動シャッター、IF1とIF2は干渉フィルター、CW1とCW2は回転NDウエッジ、R1とR2は白色反射板、NDはNDフィルター、Pは直角プリズムである。実験４では、R2照明用の光路にNDフィルターとUVフィルターが挿入される。右図の4個の小円は赤色発光ダイオードである。

0.87、0.91、0.95、1.05、1.10、1.15倍の7種の値が用いられた。外部円に対する内部円の網膜像差は交差または非交差の2方向であった。

手続　奥行判断に先立つ別に日に、外部環と等輝度になる内部円の輝度が被験者ごとにMDB法で決定された。被験者はプリズムやNDフィルターを通さずに刺激を両眼で観察した。そして、実験者が内部円の輝度を上下させている間に、内部円と外部環の境界が最も不明瞭に感じられた時点を報告した。報告のあった時の内部円の輝度が外部環に対する等輝度値として記録された。被験者が手続に習熟するまで十分練習を行った後、上昇下降各4系列の測定が行われ、8個の等輝度値の平均が求められた。

奥行判断では、まず刺激提示位置の上下左右に赤い光点が点灯し、同時に0.5 秒間予告音がなり、その1秒後に刺激が提示された。被験者の課題は、赤い4光点の中央を注視し、刺激が現れたら、内部円が外部円より手前に見えるか、後ろに見えるかをできるだけ速くかつ正確に左右の手に持った対応するキーを押して報告することであった。被験者がキーを押すと刺激が消え、試行は終了した。2秒以内に反応がない場合も試行終了となった。試行間は約8秒であった。網膜像差方向に対応しない奥行が報告された試行は後でやり直した。

波長条件ごとに7種の輝度条件の各々について、交差3および非交差3の計6試行をランダムな順序で実施して、それを１ブロックとし、1分間の休憩をはさんで2ブロック反復した。この手続を各波長条件について5分間の休憩をはさみながら実施して、それを1セッションとし、日を替えて6ないし9セッション反復した。輝度条件の実施順序はランダムにし、波長条件についてはセッション間でカウンターバランスさせた。各セッションの最初に5分間の暗順応と20試行の練習を行い、各波長条件の最初に

10試行の練習を行った。また、本セッションに先立ち、練習セッションを数日実施した。

結果

内部円の波長と輝度との各組合せに対する、網膜像差方向を込みにした平均反応時間を被験者別に図３－２１に示す。試行数は72ないし108であるが、2秒以内に反応が得られなかった試行が若干あった。また、素データの平均値から標準偏差の2倍以上離れた測定値を除いて、最終的な平均値を求めた。

全般に、内部円の波長が長いほど反応時間は短かった。また、内外両部分の輝度差が小さいほど反応時間は長かった。ただし、この輝度差の効果は内部円の波長が長いほど不明瞭であった。

被験者別に、内部円の波長、網膜像差の方向、内部円の輝度を要因とする分散分析を行ったところ、全員において波長と輝度の主効果が有意となった（波長に関しては、MF：$F(2, 1448)=656.20$, $p<.01$；HT：$F(2, 1273)=1926.75$, $p<.01$；HE：$F(2, 2086)=1855.42$, $p<.01$。輝度に関しては、MF：$F(6, 1448)=9.98$, $p<.01$；HT：$F(6, 1273)=3.41$, $p<.01$；HE：$F(6, 2086)=15.34$, $p<.01$）。網膜像差方向の主効果はHEにおいてのみ有意であった（$F(1, 2086)=20.26$, $p<.01$）。また、波長と輝度の交互作用が全員において有意となった（MF：$F(12, 1448)=10.06$, $p<.01$；HT：$F(12, 1273)=3.10$, $p<.01$；HE：$F(12, 2086)=12.17$, $p<.01$）。他の交互作用はHTにおいてのみ有意となった（網膜像差方向×輝度：$F(6, 1273)=2.68$, $p<.05$、三要因交互作用：$F(12, 1273)=2.21$, $p<.05$）。

考察

上記の結果より、図形ステレオグラムによる奥行知覚が等輝度の条件

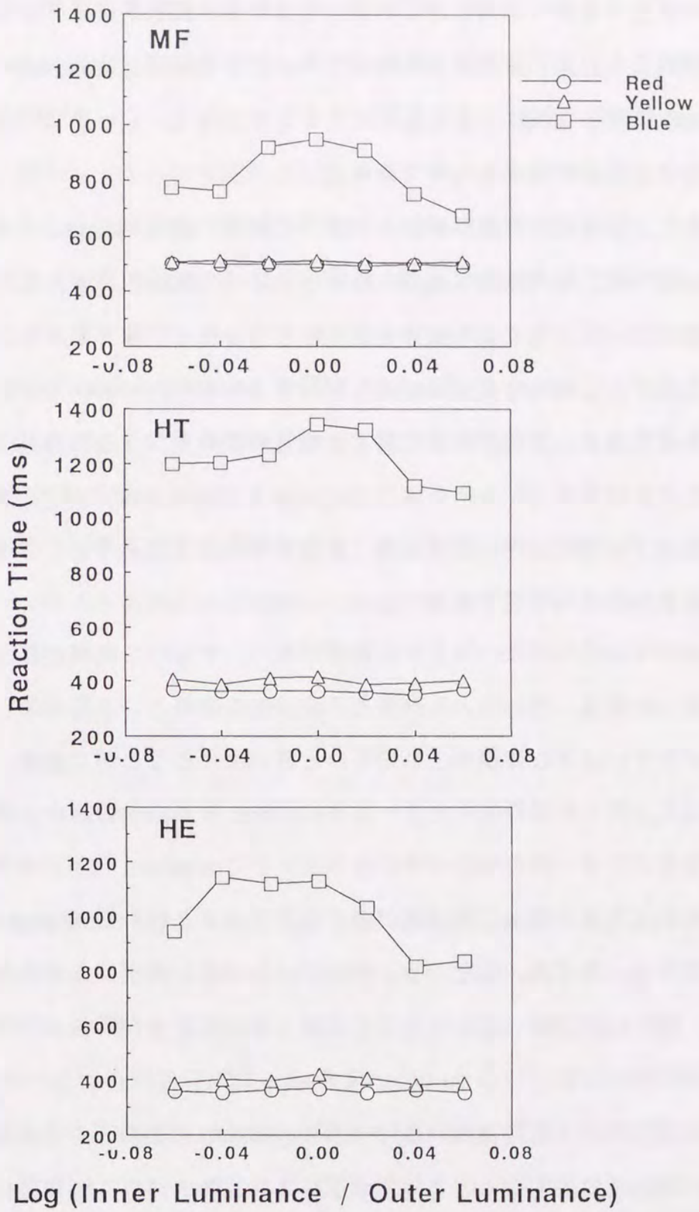


図３－２１　奥行知覚の反応時間と輝度コントラストとの関係

でも成立することは明らかである。すなわち、色情報は局所的両眼立体視機構において利用可能と結論できる。この結果は、Livingstone & Hubel (1987, 1988)の主張を否定するものであり、1－3で紹介した諸研究の主張と一致するものである。

また、内部円の波長が480nm の条件の結果に典型的に示されるように、等輝度の場合は輝度差がある場合に比べて奥行知覚が劣化している。これまた、1－3－2で紹介した諸研究の結果と一致する。しかし、この劣化が、Grinberg & Williams (1985)や Scharff & Geisler (1992)などが主張するように色差刺激に対する視覚系の低次レベルでの反応効率の低さに由来するのか、あるいは Kingdom & Simmons (1996)などが主張するように両眼立体視機構における色情報の利用効率そのものの低さに由来するのかは不明である

内部円の波長が長いほど反応時間が短い、すなわち奥行が見えやすいという結果は、内部円と外部環との波長差の効果という観点から、波長差が大きいほど立体視が生じやすいと言い換えることができる。網膜像差方向と見えの奥行方向との一致率は図形と背景の色の組合せが青－緑の場合より赤－緑の場合の方が高いという Comerford (1974)の報告や、一致率は背景と図形の色度差が増すほど上がるという Baumann (1994)の報告と一致する。また、ランダムドットステレオグラムの場合であるが、要素の色が赤－緑の組合せだと黄－緑の組合せの場合より見えの奥行が鮮明になるという de Weert & Sadza (1983)の報告とも一致する。

ところで、本実験で用いた500、580、480nm という三つの波長はユニーク色に対応するものとして選ばれた。630nm はユニーク色に対応するものではないが、それに近いものと仮定すると、内部630nm 外部500nm という組合せは色覚の反対色説における赤－緑チャンネルがもっ

ぱら活性化する条件と言えるかもしれない。すなわち、奥行の見えやすさは、単なる波長差の関数ではなく、特定の刺激波長の組合せに依存するのかもしれない。ランダムドットステレオグラムに関するものであるが、赤－緑チャンネルの情報の方が黄－青チャンネルの情報より有効であるという Jimenez et al. (1997)の報告もこの可能性を示唆する。そこで、外部480nm 内部630nm および外部480nm 内部580nm という条件を設定して実験２を行うことにした。前者の条件の方が反応時間が短ければ、やはり内外の波長差が大きいほど奥行の見えやすいという結論になろう。後者の反応時間が短ければ立体視に有利な特定の刺激波長の組合せが存在する可能性が出てくる。後者は黄－青チャンネルがもっぱら活性化することを想定した条件である。結果によっては、特定の色情報処理チャンネルと両眼立体視機構との関連を推測する手がかりが得られるかもしれない。

２－２　実験２

方法

以下の点以外は実験１と同じであった。被験者は前記の HE と HT であった。外部環の波長は480nm、内部円の波長は580nm と630nm であった。3ブロックを1セッションとし、セッションを4日間反復した。

結果

内部円の波長と輝度との各組合せに対する、網膜像差方向を込みにした平均反応時間を被験者別に図３－２２に示す。試行数は72あるが、誤反応が連続したため測定値の得られなかった試行が若干あった。また、素データの平均値から標準偏差の2倍以上離れた測定値を除いて、最終的

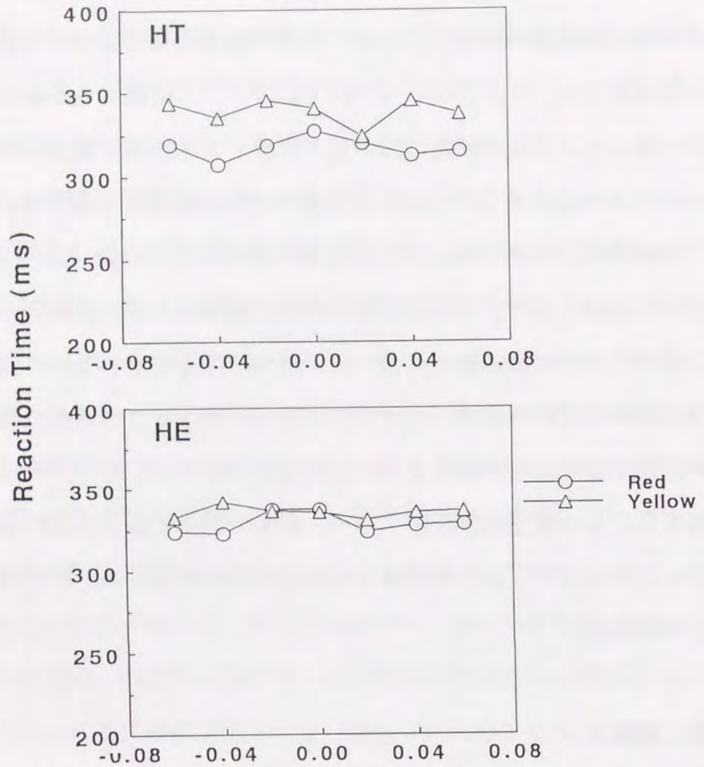


図３－２２　奥行知覚の反応時間と輝度コントラストとの関係

な平均値を求めた。

630nm の方が反応時間は短かった。いずれの波長においても一貫した輝度の効果は見られなかった。

被験者別に、内部円の波長、網膜像差の方向、内部円の輝度を要因とする分散分析を行ったところ、両被験者において波長と網膜像差方向の主効果が有意となった（波長の関しては、HT：$F(1, 969)=55.85$, $p<.01$；HE：$F(1, 968)=7.40$, $p<.01$。網膜像差方向に関しては、HT：$F(1, 969)=10.38$, $p<.01$；HE：$F(1, 968)=47.88$, $p<.01$）。その他に有意となったのは HE における網膜像差方向と輝度の交互作用のみであった（$F(6, 968)=2.83$, $p<.05$）。

考察

実験１、２の結果からは、奥行の見えやすさは刺激を構成する領域間の波長差に依存すると結論できる。すなわち、用いられた波長の範囲では、特異的に立体視に有利なあるいは不利な波長の組合せは存在しない。

第３節　等輝度図形ステレオグラムによる両眼立体視の実験的検討２
－奥行が知覚されない輝度範囲を指標として－

実験１、２では、等輝度における立体視の劣化は確認されたが、消失することはなかった。しかし、先に述べたように判断課題によって結果は変わりうる。そこで、実験１、２と同じ刺激を用い、反応時間の替わりに、ランダムドットステレオグラムではあるが奥行知覚の消失が確認された、Lu & Fender (1972)や de Weert (1979)と類似の指標を用いることにした。また、Livingstone & Hubel (1987)が指摘している等輝度設定に関する問題点を考慮して、提示時間をサッケードの停留時間より

かなり短くした。さらに、内部円の波長を増やして波長の影響を詳しく調べた。なお、以下の実験３は江草・御領（1993）において実験２として、実験４は江草・御領（1994）およびEgusa & Goryo（1996)において報告されたものである。

３－１　実験３

方法

被験者　実験１に参加したHTとMFが被験者となった。

装置と刺激　実験１、２と同じ装置および刺激が用いられた。

条件　外部環の波長は500nmで輝度は1.6cd/m^{2}であった。内部円の波長はHTでは460 ～600nmの間、MFでは460 ～560nmの間に10nm間隔で設定された。内部円には外部円に対して5′の交差網膜像差が与えられた。

手続　まず刺激提示位置の上下左右に赤い光点が点灯し、同時に0.5秒間予告音がなり、その1秒後に刺激が50ms提示された。被験者の課題は、赤い4光点の中央を注視し、刺激が現れたら、内部円が外部円より手前に見えたか否かを判断し、刺激消失後に両手に持った対応するキーを押して報告することであった。判断時間は制限しなかった。内部円の輝度が外部環より十分に低いあるいは高い（確実に奥行が知覚される）状態から出発して、奥行なしの報告がなされた後、再び奥行ありの報告が4回連続して現れるまで、内部円の輝度が0.02log単位で上昇あるいは下降させられた。

各波長条件に対して上昇下降各系列を1回ずつ実施するのを1ブロックとし、2ブロック反復された。各ブロックにおいて波長条件は長波長から

短波長へ、あるいは短波長から長波長へと順次実施され、その順序はブロック間で逆転された。試行間間隔は約5秒であり、波長条件の変更には約30秒を要した。測定に先立って5分間の暗順応時間が設けられた。

結果

各系列において最初に奥行なしと報告された輝度と直前の輝度との平均値および連続4回の奥行ありの報告のうちの最初の報告がなされた輝度と直前の輝度との平均値がもとめられ、それらが奥行が知覚されない輝度範囲の上限または下限とされた。そして、上限の対数値と下限の対数値との差を奥行が知覚されない輝度範囲の値とした。各波長条件における奥行が知覚されない輝度範囲の4系列分の平均値を被験者別に図３－２３に示す。

内外両部分が同じ波長の場合をピークとして、両者の波長差が大きくなるほど奥行が知覚されない輝度範囲が縮小する傾向が見られた。ただし、内部円の波長が最も短い460nmの条件では、逆に奥行の知覚されない輝度範囲がわずかに拡大した。

考察

本実験の判断課題では、Lu & Fender（1972)やde Weert(1979）と同様、刺激領域間にある程度の輝度差がないと見えの奥行が生じないことが示された。しかし、この結果は、両眼立体視機構が色情報を利用できないことを意味しない。なぜなら、内部円と外部環の波長差の拡大につれて必要な輝度差は減少しているからである。もし、色情報が全く利用不可能であるのなら、見えの奥行成立に必要な輝度差は波長条件に関わりなく一定になるはずである。

ただし、波長差の拡大にともなって奥行知覚成立に必要な輝度差が減少するという結果は、Lu & Fender(1972）の結果とは異なる。彼らの

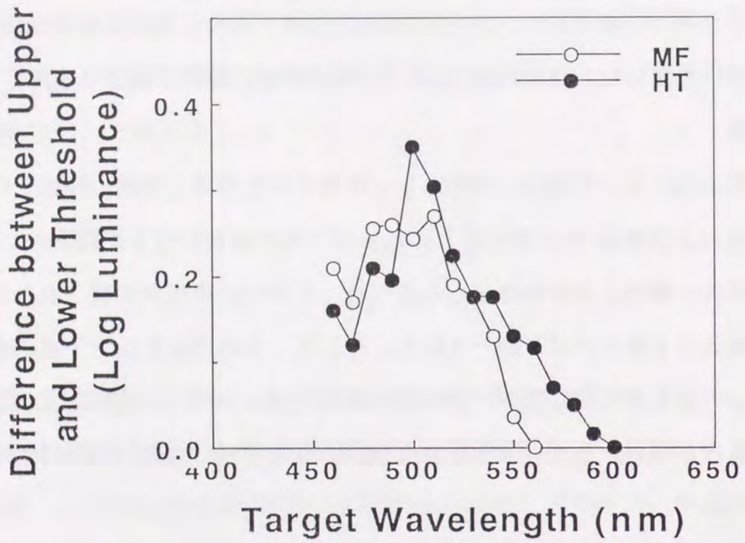


図３－２３　奥行が知覚されない輝度範囲と波長との関係

場合、条件によっては波長差が大きいほど奥行知覚されない輝度範囲が広がることがあった（図３－１１を参照）。彼らはランダムドットステレオグラムを用い、本研究では図形ステレオグラムが用いられているので、結果の差異が全体的立体視機構と局所的立体視機構の性質の差異を示している可能性はある。しかし、他に参照できるデータがないので断定はできない。

また、460nm の条件で奥行知覚不能の輝度範囲が拡大したことは、実験１、２では否定されたが、立体視の効率が刺激の波長差の単調な関数ではなく、特殊な波長依存性を持つ色覚機構が関与している可能性を示唆する。そこで、波長への依存性をさらにきめ細かく検討するために刺激条件を増やし、また、両眼網膜像差以外の奥行手がかりの関与を排除するために見えの奥行成立の基準をより厳密にして実験４を行った。

３－２　実験４

方法

被験者　正常な色覚、視力、立体視力を有する男性4名（HE、AT、TM、TN）が被験者となった。HE は著者、他は心理学専攻の大学生であった。HE は以下に述べる外部環の波長条件の全てに参加したが、他は一部の条件にのみ参加した（AT は480、500、580nm および白色。TM は480、500、580nm。TN は630nm のみ）。したがって、被験者の人数は480、500および580nm 条件では3名、630nm および白色条件では2名であった。

装置と刺激　実験１、２、３と同じであった。ただし、白色外部円の条件では、外部環用の光路に透過率25%の ND フィルターと紫外線を遮

断するためのUVフィルターを付加した。

条件　外部環の波長は480、500、580、630nmおよび白色で、輝度は1.5cd/m2であった。内部円の波長は460 ～630nm の間に10nm 間隔で18種類が設定された。内部円の外部円に対する視差は5′の交差視差であった。

手続　以下の点を除いて、手続は実験３と同じであった。

各試行は4個の赤い凝視用光点の提示で始まり、2秒後に予告音が0.5秒鳴らされた。その1秒後に凝視用光点が消え、同時に刺激が50msec 提示された。知覚された奥行が両眼観察に先立ってなされる左眼単眼観察（右眼の視野は黒い紙で覆われた）の際のそれより大きい場合にのみ奥行ありと報告するよう教示された。

内部円の各波長条件に対して内部円の輝度の上昇または下降1系列の測定を実施するのを1セッションとし、上昇および下降系列セッションを各4回、計8セッションが日を変えて行われた。各セッションにおいて内部円の波長条件は長波長から短波長へ、または長波長から短波長へと順次実施され、両方向が各々4セッションに割り当てられた。各セッションにおいて4～5波長条件ごとに3分間の休憩が挿入された。外部環の一つの波長条件について8セッションが実施された後、次の外部環条件が実施された。8セッションの各々への内部円輝度の系列の種類（上昇あるいは下降）および内部円波長の実施順序（長波長→短波長あるいは短波長→長波長）の割り振りは、被験者ごとに順序効果を相殺するように決められた。外部環の波長の実施順序は被験者ごとに変えられた。本セッションに先だって4～7回の練習セッションが行われた。

結果と考察

各系列において最初に奥行なしと報告された輝度と直前の輝度との平

均値および連続4回の奥行ありの報告のうちの最初の報告がなされた輝度と直前の輝度との平均値がもとめられ、それらが奥行が知覚されない輝度範囲の上限または下限とされた。そして、上限の対数値と下限の対数値との差を奥行が知覚されない輝度範囲の値とした。各波長条件における奥行の知覚されない輝度範囲の上限と下限各々の、被験者と8系列を込みにした平均値を図３－２４に示す。また、範囲の平均値を図３－２５に示す。

背景が単波長光の場合、いずれの波長においても、内外両部分間の波長差が大きくなるほど奥行の知覚されない輝度範囲が単調に縮小する傾向が得られた。しかし、実験３で見られたは460nm での特異的な輝度範囲の拡大は確認できず、単なる波長差以外の属性に依存する機構の関与を示す証拠は得られなかった。

白色背景の結果は580nm の背景の結果に類似しており、570nm 付近にピークを持つ単調な傾向が見られた。ところで、等輝度の白色光との弁別閾値の逆数で定義される単色光の彩度と波長との関係（彩度関数）は、これをそっくり裏返した傾向を示す（内川，1994）。また、Kaiser, Herzberg, & Boynton (1971)は、まず輝度を固定した白色光と単色光との境界が最も不明瞭に見えるように単色光の輝度を調整し（この時、白色光と単色光は等輝度と見なされる。第１章第６節を参照）、次ぎに白色光同士の境界が先の境界と同程度の明瞭さを持つ際の白色光同士の輝度比を求めた。その結果、単色光の波長と求められた輝度比すなわち境界の明瞭さとの関係は上記の彩度関数と同じ傾向を示した。このように、波長との関係が彩度と本実験の指標（奥行が知覚されない輝度範囲）とで類似していることも、両眼立体視の色チャンネルへの依存を示唆している。しかし、本実験の場合、500～520nm 付近で奥行の知覚さ

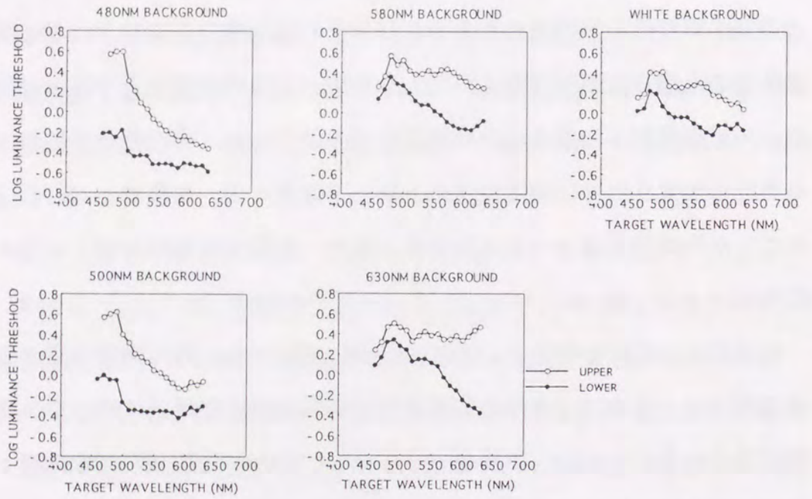


図３－２４　奥行が知覚されない輝度範囲の上限および下限と波長との関係

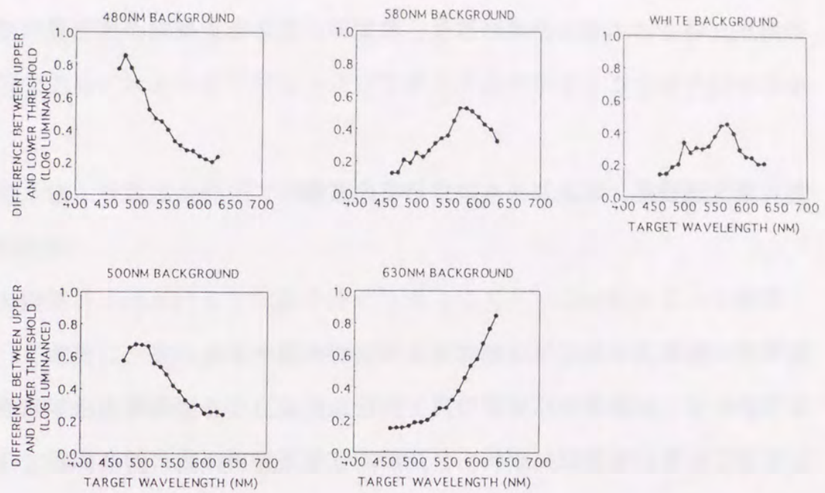


図３－２５　奥行が知覚されない輝度範囲と波長との関係

れない輝度範囲の拡大が見られたが、彩度関数やKaiser et al.（1971）の結果にはそのような特異点は見られない。この拡大傾向が何を意味するのかは今のところ不明である。

第４節　実験１、２、３、４についての考察

実験１、２においては、ステレオグラムを構成する内部円と外部環の波長差の拡大につれて奥行知覚成立の潜時が減少した。また、実験３、４において、波長差の拡大につれて奥行知覚成立に必要な輝度差が減少した。これらの結果はいずれも、局所的立体視機構が色情報を利用でき、しかも、その効率は刺激を構成する波長差にともなって増大することを示唆している。また、波長差と輝度差との間に一種のトレードオフが存在することは、Simmons & Kingdom（1997）が挙げている、両種の情報が加算された後に単一の立体視機構に入力されるという可能性を示唆する。もっとも、彼らはこの可能性を否定している（図３－１７を参照）。そのような加算性は、de Weert（1979）によっても示唆されている。

Comerford（1974）は、先に述べたように、背景と図形の色の組合せによって網膜像差方向と報告された奥行方向との一致率が異なる（たとえば、青－緑の場合より赤－緑の場合の方が高い）という結果を得た。そして、ステレオグラムを構成する各領域の彩度や色相の組合せによって、領域間の境界の明瞭さが異なり、それが立体視の精度の差違を生む、すなわち境界が不明瞭なほど立体視の精度が下がると解釈した。

Osuobeni & O'Leary（1986）も同様の見解を取っている。実験４の白色背景の結果がKaiser et al.（1971）の境界の明瞭さに関する結果と類似の傾向を示したことも、この仮説を支持するようにみえる。しかし、か

ならずしも境界の明瞭さ自体が立体視を規定していると考える必要はない。輝度差や波長差が境界の明瞭さと見えの奥行の鮮明さとの共通の原因であると考える方がむしろ自然であろう。

第５節　等輝度条件下での絵画的奥行手がかりに基づく奥行知覚の実験的検討

ここでは、奥行知覚を直接測定する替わりに、幾何学的錯視の測定を通じて、絵画的奥行手がかりに基づく奥行知覚への色情報の寄与を間接的に検討した。なお、以下の実験は江草・御領（1998）において報告したものである。

５－１　幾何学的錯視に関する遠近法説

幾何学的錯視とは、視覚的に提示された平面図形の大きさや形などが客観的な姿とは異なって知覚される現象である。幾何学的錯視には様々な種類があるが、それらの生起のしくみを説明する理論にも様々なタイプがある。たとえば、大脳皮質視覚野にある特徴検出細胞間の側抑制など、視覚神経系における生理学的相互作用に起源を求める理論がある。また、神経学的実体には触れず、注意や同化などの高次の認知的過程を重視する理論もある（Coren & Girgus, 1978）。

後者のタイプの理論の一つに、大きさの恒常性と共通のしくみによって幾何学的錯視を説明しようとするもの（たとえば、Gregory, 1963, 1968）があり、遠近法説と呼ばれる（山上・牧野, 1982）。大きさの恒常性とは、同一の対象を異なる距離から見た場合、網膜像の大きさは異

なるのに、知覚される大きさはそれほど違わないという傾向を指す。この知覚的傾向は、対象の大きさの視知覚過程に網膜像の大きさの情報を対象までの距離の情報で補正するしくみが組み込まれていることに起因すると説明されることが多い。この説では、対象までの距離の変化によって対象の網膜像の大きさの情報が変化しても、距離の情報の変化がそれを相殺するため、知覚上の大きさは一定に保たれると考える。

一方、同じしくみによって、網膜像の大きさの情報が一定でも、距離の情報が変化する場合には、知覚される大きさが変化するということが起こる。たとえば、より遠くにあるという情報が与えられれば、網膜像の大きさが同じでも、より大きく知覚される。幾何学的錯視の遠近法説では、ある種の錯視図形に絵画的奥行手がかりが含まれていることに注目する。そして、そのような手がかりの与える距離情報が大きさの恒常性のしくみを作動させることによって錯視が生じると考える。たとえば、図３－２６のＣでは、斜め線分のペアが絵画的奥行手がかりの一種である線遠近法パタンと見なされる。そして、この手がかりによって、2本の水平線分のうちの上部にある方が「より遠くにある」という情報が与えられるため、2本の水平線分の長さが実際には同じであるにもかかわらず、上部の線分の方がより長く見えるというわけである。

５－２　等輝度条件下での幾何学的錯視

５－２－１　Livingstone & Hubel (1987, 1988)の報告

Livingstone & Hubel (1987, 1988)は、等輝度条件下での奥行知覚に関する自分たちの観察と幾何学的錯視の遠近法説とを組み合わせて、絵

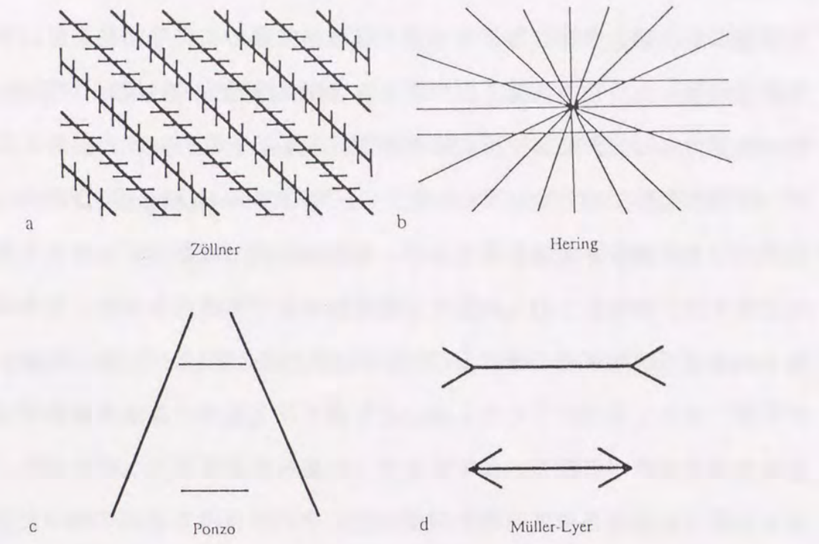


図３－２６　Livingstone & Hubel (1987) の幾何学的錯視図形

画的奥行手がかりを含む錯視図形を等輝度刺激として描いた場合には錯視は起こらないと予測した。そして、図３－２６のような図形を用いて予測を例証した。たとえば、図中のａはZöllner図形と呼ばれ、白黒で描いた場合には実際には平行の線分群が延長すると交わるように見えるが、等輝度条件では完全に平行に見えた。図中ｂのHering図形の場合、白黒では水平線分が曲線に見えるが、等輝度図形では物理的な姿通り直線に見えた。また、これらの見えは眼を動かしても維持された。図中ｃのPonzo図形やｄのMüller-Lyer図形が白黒の場合には、上の水平線分が実際には同じ長さの下の水平線分より長く見えるが、等輝度条件では見えの長さの差が減少し、消失することもあった。ただし、錯視が生じない場合でも図形自体は明瞭に知覚され、その知覚はP経路の働きによると解釈された。

５－２－２　他の報告

しかし、幾何学的錯視に関する彼らの報告には反証が多い。図形と背景の明るさが等しく色のみ異なる場合でも、明るさの差がある場合と同様な錯視が生じるという報告だけでなく、明るさの差がない方がかえって錯視量が増すという報告まである。

たとえば、Gregory (1977)は、立体視の項で述べた方法で実験を行い、Ponzo図形、Müller-Lyer図形、Zöllner図形のいずれにおいても等輝度条件下で輝度差がある場合と同じように錯視が生じると報告した。そして、これらの錯視の起源が視覚系の高次の部分にあると推論した。

Pollack (1970)は、灰色のマンセル色紙（N 5/）上に等明度の赤（5R 5/6）、黄（5Y 5/6）、緑（5G 5/6）または青（5B 5/6）のマンセル色紙

で図３－２７のような線図形を描き、タキストスコープで1.5秒間提示した。同じ図形が黒字に白で描かれた刺激も用意された。線の幅は全て1mmで、Müller-Lyer図形（図中の左側）の主線の長さは22mm、矢羽の長さは5mmであった。凝視点を中央に挟んで主線の右10mmの位置にある垂直線分は0.5mmのステップで長さが変えられた。刺激面全体の大きさは1°54′四方で、照度は1.14ft-cであった。被験者は1.5mの距離から中央の点を凝視しながら観察し、Müller-Lyer図形の主線の長さと線分の長さとを比較した。そして、階段法の手続で主線の長さの主観的等価値が求められた。

その結果、成人の被験者では、図形と背景とで明るさが異なる無彩色刺激より、明るさが等しい有彩色刺激の方がわずかに錯視量が多かった。また、錯視量は色相によって異なり、赤＞黄＝青＞緑の順に大きかった。ただし、同様な実験でも、この順序をEbert & Pollack (1972)は赤＞青＞黄と報告し、Youn, Lambert, & Pollack (1987)は赤＝青＞黄＞緑と報告した。

Pollack & Jeager (1991)もほぼ同様の方法で実験を行ったが、背景は明るい灰色（N 7.5/）と暗い灰色（N 5/）の2種類とし、図形の色には赤と青のみを用いた。また、凝視点を比較線分の右8mmに置く周辺視の条件を付け加えた。その結果、図形と背景の明るさが等しい場合の方が、差がある場合より錯視量が大きいことが示された。そして、彼らは、明るさの差違のみの図形での錯視はM系で検出される明るさ境界（輪郭）間の相互作用に基づき、色の差異のみの図形の場合はP系で検出される色境界（輪郭）間の相互作用に基づくと推測した。さらに、M系からP系への抑制的な作用の存在も示唆された。

Li & Guo(1995)は、先に述べた装置を用い、Zöllner図形、

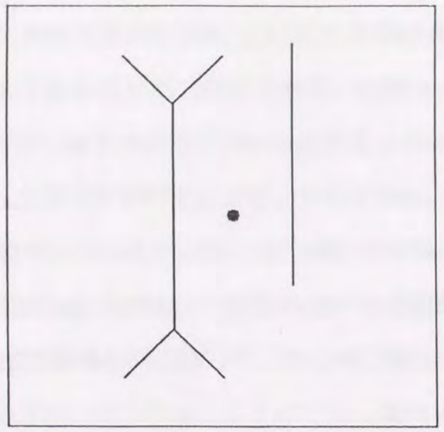


図３－２７　Pollack & Jeager (1991)の刺激図形

Müller-Lyer 図形、Ponzo 図形（図３－２８を参照）について錯視量を求めた。Zöllner 図形の長い線分の長さは6.5°で間隔は1.3°、短い線分の長さは1°で間隔は0.4°であった。線分の幅は6.3′であった。被験者は、左から2番目と4番目の線分の傾きを他の2本と平行に見えるように調整した。Müller-Lyer 図形の長さは11°、幅は12.5′であった。被験者は、外向、内向両図形の主線の長さが等しく見えるように、中央の矢羽の位置を調整した。Ponzo 図形の左側の垂直線分の長さは4°、垂直線分間の間隔は9.2°であった。被験者は、2本の線分が同じ長さに見えるように、右側の先負の長さを調整した。

その結果、いずれの錯視図形においても、等輝度条件と同色条件（コントラストは0.98）との間に錯視量の差は見られなかった。また、同色の Zöllner 図形について、コントラストを変化させたところ、0.15では錯視が生じず、錯視量が極大に達するには0.78のコントラストが必要であった。これらの結果から、Ｐ系の関与が推測された。

５－３　問題点

Livingstone & Hubel (1987, 1988)と他の研究者たちは相反する結果を報告しているが、実験方法も様々な点で異なっている。第一に、刺激の提示方式が異なる。Livingstone & Hubel(1987, 1988)や Li & Guo (1995)は CRT を用いている。それに対して、Gregory (1977)はスライドの映写像を用いており、Pollack ら（Ebert & Pollack, 1972; Pollack, 1970; Pollack & Jeager, 1991; Youn et al., 1987）は色紙を用いている。第二に、等輝度の決定方法の差違が挙げられる。Livingstone & Hubel や Li & Guo(1995)は交照法を用いている。一方、Gregory(1977)は輝度

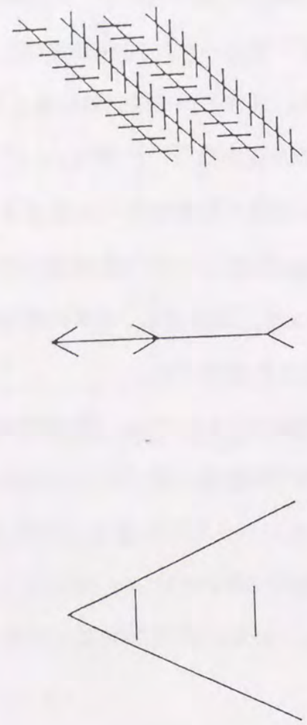


図３－２８　Li & Guo（1995）の刺激図形

計による測定値の一致を等輝度の基準としている。また、Pollack らはマンセル表色系における明度の一致を基準としている。このように、用いられた刺激の光学的性質がかなり異なるので、幾何学的錯視に関する上記の諸報告を単純に比較することはできない。

また、Livingstone & Hubel（1987, 1988）は、等輝度刺激における幾何学的錯視の消失のデモンストレーションを行っただけであって、図形・背景間の輝度差と錯視量との関係を組織的に検討したわけではない。さらに、上記の諸研究では絵画的奥行手がかりを含むと見なされる錯視図形が取り上げられているが、必ずしも絵画的奥行手がかりを含むとは言えない錯視図形も多い。Livingstone & Hubel（1987, 1988）が主張するように、絵画的奥行手がかりを含む図形では等輝度条件下で錯視が消失するとしても、含まない図形では等輝度条件下でも輝度差がある場合と同様に錯視が生じるかもしれない。たとえば、ある錯視の起源がＰ経路に属するしくみにあると仮定するならば、先に述べたＰ経路の神経生理学的特性から、その錯視は等輝度条件下でも生じうると推測できる。

以上のことを踏まえ、実験５では、CRT 画面上に直線要素のみで構成された長さに関する幾何学的錯視図形を提示した。そして、図形と背景との輝度関係として等輝度だけでなく輝度差のある条件を複数設定して、錯視量への影響を調べなおした。さらに、線遠近法パタンを含むと見なされる図形と含まないと見なされる図形との比較を行い、等輝度条件下での絵画的奥行手がかりの有効性を検討した。

５－４　実験５

５－４－１　CRT 画面の明るさの測定

錯視を測定するために、CRTディスプレイの画面上に赤い錯視図形と緑の背景を提示したが、各領域の明るさはコンピュータープログラム上の数値によって制御した。その準備として、錯視の測定に先立ち、プログラム上の特定の数値で指定される緑および赤の画面の明るさを別の白色透過面の輝度に換算するための測定を行った。

方法

被験者　心理学を専攻する大学生4名（以下、MY、KT、HM、MSと略記する）が参加した。ただし、全員、研究の目的についての知識はなかった。視力はMYが裸眼で左右とも1.5、MSは左右とも1.0、HMは左が1.2で右が0.7、KTのみ矯正で左右とも1.0であった。全員、色覚は正常であった。

装置　刺激の提示にはカラーCRTディスプレイを含む視聴覚刺激提示装置（岩通アイセル製、IS-701C）を用い、その制御および反応の記録はコンピューター（NEC製、PC-9801FA）で行った。CRTの解像度は約200*200mmの表示画面に対して512*512画素であった。赤蛍光体のCIE色度座標はx=0.62、y=0.35で、緑蛍光体の色度座標はx=0.29、y=0.60であった。各々の明るさは、制御用プログラム上で0から255までの数値を指定することにより、画素ごとに256段階に変化させることができた。また、CRT画面の明るさの換算に用いられる白色透過面の照明光源にはスライドプロジェクター（キャビン工業製、Color Cabin Ⅱ）が用いられ、明るさの調整には長方形NDウェッジが用いられた。さらに、CRT画面からの光とプロジェクターからの光とを重ね合わせるために、2個の直角プリズムを底面で貼り合わせたものが光路に置かれた。プリズムのCRT側には中央に直径3cmの円形の穴を開け黒く塗ったアルミ板が取り付けられ、プロジェクター側には白色半透明の合成樹脂板が取り付けられた。プリズムの接合面は、中央の楕円形の部分がプロジェクターからの光を被験者の方へ透過させ、他の部分がCRTからの光を被験者の方へ反射するように加工された。プロジェクターからプリズムまで、およびプリズムから被験者の眼までの光路は内部を黒く塗った遮光用の筒で覆われた。装置の配置の概略を図３－２９Ａに示す。

実験は暗室で行われ、さらに上記の装置全体が内部を黒く塗った遮光箱の中に収められた。被験者は、装置用遮光箱に接続された遮光ブースの中に座り、プリズムの接合面の中心が右眼の正面、眼の高さになるように顔面固定器で頭部を固定した（図３－２９Ａを参照）。プリズムの接合面の中心から被験者の眼までの距離は50cmであった。

刺激　刺激パタンは被験者から見ると二重同心円形であり、内円の直径は視角にして1.13°、外円の直径は3.41°であった。内円部にはプロジェクターによって背後から照明された白色半透明板が見えており、外環部には赤または緑の蛍光体のみが発光しているCRT画面が見えていた。刺激パタンは、暗黒を背景に、中心の位置が被験者の右眼の正面、眼の高さになるように提示された。

手続　刺激パタンの内円部と外環部の輝度が等しい状態をMDB法で決定し、その際の内円部の輝度を求めた。被験者は遮光筒を通して右眼で刺激パタンを観察した。実験者はNDウエッジによって内円部を外環部より明らかに明るい状態から徐々に暗くするか（下降系列）、あるいは外環部より明らかに暗い状態から徐々に明るくした（上昇系列）。そして、被験者が内円部と外環部の境界が最も不明瞭になったと報告した際の内円部の輝度を輝度計（ミノルタ製、nt-1° p）によって測定した（以下、この輝度を換算された輝度と呼ぶ）。

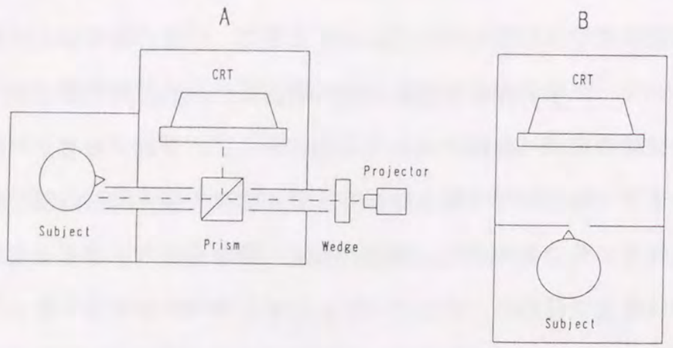


図３－２９　装置の略図。Ａはディスプレイ画面の明るさ測定の際の配置、Ｂは錯視測定の際の配置である。

外環部すなわちCRT画面の明るさとしてプログラム上の指定値の30、60、90、120、150、180および210に対応する7種類が選ばれた。7種の明るさと赤および緑の2色との組み合わせによる14条件の各々に対して上昇下降各1系列の測定が3日間繰り返された。いずれの日も測定に先立って5分間の暗順応が行われた。

結果

被験者ごとに14の条件の各々に対する2日目と3日目の計4系列分の測定値の平均を求めた。さらに、被験者ごと色ごとに明るさ指定値の対数値と換算された輝度の平均値の対数値との直線回帰式を求めた。決定係数は全て0.94以上であった。

５－４－２　錯視の測定

ディスプレイ画面の明るさの測定に続いて、錯視の測定を行った。特定の換算された輝度を持つ錯視図形や背景をCRT画面上に表示するために必要なプログラム上の指定値を、先に求めた直線回帰式を用いて算出した。

方法

被験者　CRT画面の明るさの測定に参加した4名が錯視の測定にも参加した。

装置　刺激の提示と反応の記録用に前述のコンピューターと視聴覚刺激提示装置のみが用いられ、他の器具は除かれた。被験者用遮光ブースはCRTディスプレイの正面の位置で装置用遮光箱に接続された。被験者は、遮光ブースの中でCRTディスプレイに向かって座り、その画面の中心が右眼の正面、眼の高さになるように顔面固定器で頭部を固定し

た（図３－２９Ｂを参照）。観察距離は57cmであった。

刺激　用いられた4種の幾何学的錯視図形を図３－３０に示す。これらの図形では客観的には同じ長さの部分間に以下のような知覚的関係が生じることが知られている。Müller-Lyer図形（図中のA）では斜め線分付きの水平線分が斜め線分なしの水平線分に比べて過大視される。Ponzo図形（B）では上の水平線分が下の水平線分に比べて過大視される。分割距離錯視図形（C）では分割された距離（左側の9本の垂直線分の列の両端の線分間の距離）が分割されない距離（右側の2本の垂直線分間の距離）に比べて過大視される。垂直水平錯視図形（D）では垂直線分が水平線分に比べて過大視される。本研究では、Müller-Lyer図形とPonzo図形は線遠近法パタンを含み、分割距離錯視図形と垂直水平錯視図形は含まないと仮定した。

Müller-Lyer図形の水平線分の長さは視角にして3.20°であった。斜め線分はいずれも1.60°の長さで水平線分と150°の角度で交わっていた。さらに、錯視図形の水平線分の左端の2.00°下、2.00°右の位置から始まる比較用の水平線分が描かれた。その長さは2.56°から4.80°まで0.16°の間隔で15段階に変化させることができた。Ponzo図形の斜め線分は長さが5.04°で垂直方向から30°傾いていた。上の水平線分は、両端が左右の斜め線分の上端の0.84°真下にあり、長さが3.20°であった。下の水平線分は上の水平線分の2.80°下方にあり、その長さは2.40°から4.64°まで0.16°間隔で15段階に変化させることができた。分割距離錯視図形は、等間隔に並んだ長さ3.20°の垂直線分９本からなり、両端の線分間の間隔は3.20°であった。その右側の同じ高さに2本の長さ3.20°の垂直線分が比較用に描かれた。錯視図形の右端の線分と左端の比較用線分との間隔は1.76°であった。また、2本の比較用線分の間隔は2.4

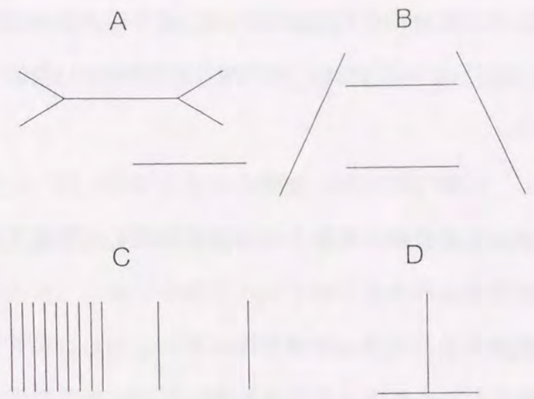


図３－３０　刺激図形

0°から4.64°まで0.16°間隔で15段階に変化させることができた。垂直水平錯視図形の水平線分の長さは3.20°で、水平線分の中点に接続する垂直線分の長さは1.44°から3.68°まで0.16°間隔で15段階に変化させることができた。

図形は幅0.04°の線で描かれ、背景の大きさは縦5.12°、横10.2°であった。図形および背景は、背景の中心が被験者の右眼の正面、眼の高さになるように提示された。

図形は赤の蛍光体のみを発光させて描かれた。明るさは、換算された輝度0.8cd/m²を中心に、その上下に対数値にして0.05の間隔で6種類ずつ、計13の条件が設定された。背景の部分は緑の蛍光体のみが発光しており、明るさは換算された輝度0.8cd/m²に固定された。これらの明るさを実現するためのプログラム上の指定値は先に述べた直線回帰式を用いて算出された。背景の周囲は暗黒であった。

手続　極限法を用いて、Müller-Lyer 図形の水平線分、Ponzo 図形の上の水平線分、分割距離錯視図形の両端の線分間の間隔および垂直水平錯視図形の水平線分（以下、これらを標準刺激と呼ぶ）の長さの主観的等価値を求めた。比較刺激は、Müller-Lyer 図形の下方の水平線分、Ponzo 錯視図形の下の水平線分、分割距離錯視図形の右側の２本の垂直線分の間隔、垂直水平錯視図形の垂直線分であった。被験者は、右眼で図形を観察し、標準刺激に比べて比較刺激が「より長く見える」か、「同じに見える」か、あるいは「より短く見える」かを口頭で報告した。被験者には観察中は背景の中心部を凝視するように教示した。判断時間は制限しなかった。

図形ごと輝度条件ごとに上昇系列と下降系列を4回ずつ実施した。1日に1種の図形について測定を行い、13種の輝度条件はランダムな順序で実

施した。4種の図形の実施順序は被験者間でカウンターバランスさせた。各図形の測定に先立ち、5分間の暗順応を行った。また、最初の輝度条件のみ上昇下降各1系列の練習を行った。輝度条件間には数分の休憩が挿入された。

結果

標準刺激の長さの主観的等価値から標準刺激の物理的な長さを引いて錯視量を求めた。各輝度条件における錯視量の平均値を被験者別、図形別に図３－３１に示す。いずれの被験者においても、Müller-Lyer 図形、Ponzo 図形、分割距離錯視図形においては錯視量が正の値となり、垂直水平錯視図形では負の値となった。これら結果は、先に述べた、従来知られている錯視の傾向と一致する。

被験者ごとに図形の輝度と種類を要因とする2要因分散分析を行ったところ、錯視量に対する図形の輝度の主効果について、被験者 KT と HM では統計的に有意となり（$F(12, 364)=3.92$, $P<0.01$； $F(12, 364)=8.23$, $p<0.01$）、MY と MS では有意とならなかった（$F(12, 364)=0.98$, $P>0.50$； $F(12, 364)=1.05$, $P>0.40$）。また、輝度と図形の種類との交互作用が全員において有意となった（MY：$F(36, 364)=2.46$, $P<0.01$； KT：$F(36, 364)=3.80$, $P<0.01$； HM：$F(36, 364)=4.27$, $P<0.01$； MS：$F(36, 364)=3.36$, $P<0.01$）。しかし、図3から明らかなように、どの被験者、どの図形においても、図形の輝度によって錯視量は不規則に増減しており、特定の輝度条件において錯視量が特に大きく減少するという傾向は見られなかった。

５－５　考察

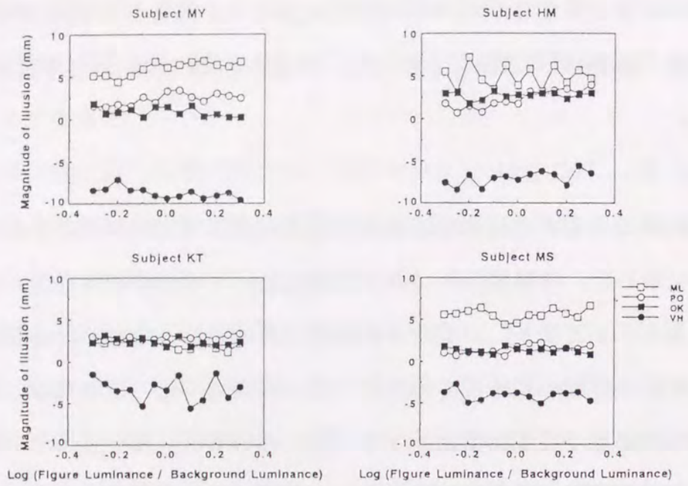


図３－３１　錯視量と輝度コントラストとの関係

実験５では、長さに関する4種の幾何学的錯視図形を用い、図形と背景との輝度関係を等輝度も含めて13段階に変化させた。その結果、線遠近法手がかりの有無に関わりなく、いずれの図形、いずれの輝度条件においても従来から知られている通りの錯視が生じ、錯視量もほぼ一定となった。Müller-Lyer 図形や Ponzo 図形に関する結果は Livingstone & Hubel（1987, 1988）を除く多くの研究者の報告と一致する。また、垂直水平錯視図形に関しては、Cavanagh（1989）が同様な結果を報告している。

ただ、錯視の減退が見られなかったことに対しては、等輝度条件の設定が不適切であったからという批判がありうる（Livingstone & Hubel, 1987）。なぜなら、等輝度で減退する現象でもわずかな輝度差があれば完全に生じること（たとえば、Gregory, 1977; Osuobeni & O'Leary, 1986）や、ある現象が最大の減退を示す輝度関係と交照法などで定義される等輝度とがずれうること（たとえば、Livingstone & Hubel, 1987; Osuobeni & O'Leary, 1986）が知られているからである。しかし、本研究に関しては、図形の輝度を MDB 法で決定された等輝度点の上下に0.05対数単位で6段階ずつ設定しているので、この批判は当てはまらないと考えられる。

Livingstone & Hubel（1987, 1988）と本研究を含めた多くの研究との結果の食い違いは何に起因するのであろうか。Pollack & Jaeger（1991）は刺激の提示法の差異を挙げているが、本研究や Li & Guo（1995）の刺激提示法は Livingstone & Hubel（1987, 1988）と類似しており、必ずしもこのことが原因とは言い難い。また、Cavanagh（1991）は、等輝度条件における視覚の解像度の低さを根拠に、錯視図形を構成する線が細すぎたため等輝度条件下では図形の細部が見えにくくなり、それが錯視を

減退させたのではないかと推論している。しかし、Livingstone & Hubel (1987, 1988)は図形の全ての要素が完全にはっきり見えていたと述べている。

このように、Livingstone & Hubel(1987, 1988)の報告の特異性の原因は明らかではない。しかし、彼ら以外の多くの研究が一致して示すところからして、線遠近法パタンを含むと考えられる幾何学的錯視図形であっても、錯視は等輝度条件下で輝度差がある場合と同様に生じると結論するのが妥当であろう。

以上のような等輝度条件下での幾何学的錯視に関する事実と、1－4で紹介した絵画的手がかりによる奥行知覚を直接調べた諸研究の結果とを考えあわせると、Livingstone & Hubel(1987, 1988)の主張に反して、絵画的奥行手がかりに基づく奥行知覚は等輝度状況下でも輝度差がある場合と同様に生じうると結論せざるをえない。

第4章　結語

第1節　奥行手がかりとしての色

過去の諸研究および著者の実験の結果より、色の三属性のいずれもが進出後退現象を引き起こす、すなわち奥行手がかりとして働きうると結論できる。ただし、その現れ方は明るさや彩度と色相とで異なる。この現象の差違は、色が奥行手がかりとして働くしくみが二種類あることを推測させる。この二種のしくみの各々に関して、本研究は色収差説と図－地知覚説という二つの仮説を提唱する。そして、第1章における種々の検証結果が示すように、この仮説によって色の進出後退現象のほぼ全てが説明可能である。

1－1　明るさおよび彩度

過去の諸研究および著者の実験の結果より、明るさや彩度の属性が奥行手がかりとして働きうることは明らかである。そして、その現れ方は、背景との明るさの差異や彩度の差違が大きい対象ほどより近く見える、まとめることができる。しかも、この現れ方は両眼視と単眼視とに共通である。

距離知覚に対する明るさや彩度の効果が発生するしくみについては、見えの大きさ説や大気遠近現象に関する過去経験説など、さまざまな説明が提案されてきた。しかし、いずれも基礎となる事実が曖昧であったり、その仮説からの予測に反する事実が存在したりして、とても十分とは言えない。特に、これまで提案されたどの説をもってしても、本研究

の実験１１や１８の結果は説明しえない。

本研究は、それらに替わるものとして、距離・奥行知覚に対する明るさの効果が図と地の分化として生じるという仮説、すなわち図－地知覚説を提案する。第１章で詳しく検討したとおり、この説は、本研究の実験結果を含めた、明るさや彩度の効果に関する既知の事実全てに適合する。

１－２　色相

距離知覚への色相の効果は単眼視と両眼視とで現れ方が異なる。無彩色背景上の有彩色対象を単眼視する場合は、色相の効果が存在するとしてもきわめて微弱である。しかし、対象と背景とがともに有彩色である場合は、両者の色相差が大きい対象ほど近く見える。両眼視の場合は、無彩色背景上の有彩色対象に関する進出後退現象が明瞭である。たとえば、背景が黒の場合は長波長の、あるいは赤系統の刺激ほど、背景が白の場合は短波長の、あるいは青系統の刺激ほど近く見える。

両眼視での色相の効果に対しては、過去の研究を総括した結果より、眼球の色収差および視軸と瞳孔中心との位置ずれが生み出す両眼網膜像差による両眼立体視として発生するとする説、すなわち色収差説が最も適切と結論できる。

図－地知覚説は、両眼視での色相の効果に対しては、矛盾する事実が存在し、不適切である。しかし、単眼視での色相の効果に対しては十分適合する。また、両眼視での色相の効果を否定した Oyama & Yamamura (1960) の報告についても、その刺激布置の特性からして、図－地知覚説を適用すべきである。

１－３　三属性の働き間あるいは二種の機構間の相互関係

三属性の全てが奥行手がかりとして機能することが明らかとなったが、それらの働きの相互関係はどうなっているのであろうか。本研究の実験はいずれも、各属性を単独で操作しているので、この問に答えることはできない。しかし、過去の諸研究からは、それらの働きが加算的であると推測できる。

たとえば、Mount et al. (1956) は背景との明るさの差違が大きい対象ほどより近く見え、しかも同じ明るさなら灰色より有彩色の方が近く見えることを報告しているが、この結果は明るさの効果と彩度の効果が加算的であることを示唆する。さらに、図－地知覚説を前提とすれば、隣接二領域あるいは図－地間の知覚的奥行量が領域間の明るさ差と彩度差の和の関数になることを予測させる。ただし、この予測の確認は将来の課題である。

また、両眼視の場合に色相の効果と明るさの効果が加算されることを示唆する研究もある。たとえば、大山・量（1934）は、二つの発光刺激の明るさが等しいと長波長刺激が進出するが、長波長刺激を暗くするか、または短波長刺激を明るくすると、見えの距離の差が減少し、さらに明るさの差違を増すと短波長刺激が進出するようになると報告している。

ところで、明るさ・彩度の効果および色相の効果それぞれの根底にある機構について本研究が主張する二つの仮説は、説明のレベルが異なる。色収差説は物理学的あるいは神経生理学的レベルの説明といえる。色収差は眼球の光学的性質であり、両眼網膜像差の働きについては神経機構が明らかにされているからである。一方、図－地知覚説は現象論レベル

の説明である。すなわち、現在のところ、両仮説は関連づけられていない。しかし、先に述べたように、色相と明るさは加算的に働く。これは図－地知覚による奥行情報と両眼網膜像差による奥行情報とがどこかで統合されていることを意味する。この情報統合のあり方を解明するためにも、両仮説の統合が望ましい。そのためには、図－地知覚の神経機構を明らかにするという道筋が考えられよう。

第２節　奥行情報の伝達者としての色

２－１　両眼立体視

全体的立体視に関しては、等輝度で消失あるいは劣化するという研究と輝度差がある場合と同様に維持されるという研究が相半ばする。しかし、判断課題の差違などを考慮すると、等輝度でもすなわち色差のみの刺激でも立体視は可能であるが、輝度差がある場合に比べて生じにくいと結論するのが妥当であろう。

局所的立体視に関しては、等輝度での消失の報告は Livingstone & Hubel (1987, 1988)と本研究の実験３、４ぐらいのものである。他の研究は全て等輝度でも維持され、せいぜい少し劣化するだけと報告している。本研究の実験３、４の結果にしても、奥行知覚の刺激波長への依存性を明瞭に示しており、色情報の両眼立体視への寄与は否定できない。

すなわち、局所的と全体的の区別に関わりなく両眼立体視機構は色情報を利用できる、あるいは色チャンネルは両眼網膜差情報を伝達できると結論できる。

両眼立体視機構が色情報と明るさ情報の両方を利用できることが明らかとなったが、この方がむしろ自然だとも言える。形態知覚においては、色と明るさの両方の境界情報を利用する方が、影による境界と物体間あるいは物体と背景間の境界とが混同されやすい明るさ情報だけに依存するより外界適合的な認識が得られるという考え方（Cavanagh, 1991）がある。三次元的な形態知覚でもある両眼立体視においても事情は同じなのかもしれない。

しかし、色情報の両眼立体視における役割の細部については未だ不明の点が多い。将来の研究にゆだねられた課題を以下に挙げておく。

（１）色情報の有効性の低さの原因

等輝度では輝度差がある場合に比べて立体視が生じにくい、すなわち立体視への色情報の寄与は明るさ情報の寄与に比べて弱いように見える。この差違が、両眼立体視機構での色情報の利用効率が低いことのよるのか（Kingdom & Simmons, 1996、など）、それとも視覚系の低次レベルでの色差に対する感度が輝度差に対する感度より低いため、色チャンネルは両眼立体視機構への十分強い入力を作り出せないのか（Scharff & Geisler, 1992、など）を今後明らかにして行かねばならない。

（２）色情報の有効性に関する全体的立体視と局所的立体との差違

色情報の利用効率は全体的立体視機構の方が局所的立体視機構より低いように見える。Kingdom, Simmons, & Rainville (1999)は網膜像差の処理そのものに関しては、両機構で色情報の利用に差はないと主張する。ただし、全体的立体視に特有の、局所的な網膜像差情報を補間して全体的な面を生成する過程は色情報では十分機能せず、そのため、等輝度刺激では奥行を持った面が見えても面の形が知覚しにくくなると考えている。そして、被験者の課題に形態判断が含まれている研究では、全体的立体視の方が等輝度条件下で損なわれやすいという、見かけ上の結果が

得られる可能性があると言う。また、ステレオグラムの種類以外は類似した方法を用いたLu & Hender(1972) の報告と本研究の実験３、４の結果とで、奥行知覚が不可能になる輝度範囲の波長依存性が異なることも、色情報の利用に関して両機構間に差違がある可能性を示唆する。しかし、色情報の利用に関して二種類の立体視機構間に差があるか、という問題はさらに検討する必要がある。

（3）立体視における色情報と明るさ情報との独立性

両眼立体視において色情報と明るさ情報の両方が利用されていることは今や明らかである。しかし、両情報が同一の両眼立体視機構機構に入力しているのか、それとも、それぞれ別個の立体視機構に入力しているのかという問題が残っている。

（4）色覚機構と両眼立体視機構との関係の詳細

Jimenez, Rubino, Hita, & Del Barco (1997)は、赤－緑チャンネルの情報の方が黄－青チャンネルの情報より両眼立体視に対して有効であると主張した。しかし、色覚機構と両眼立体視機構との関係の細部、たとえば3種の錐体や2対の反対色チャンネルの活動の寄与はさらに追求されねばならない課題である。

２－２　単眼性奥行知覚

研究例は両眼立体視に関するものほど多くないが、奥行知覚を直接扱った多くの研究は、絵画的奥行手がかりは等輝度条件下でも十分有効であり、輝度差がある条件に比べてもほとんど劣らないことを示している。また、間接的方法を取った本研究の実験結果も同様の傾向を示した。したがって、絵画的奥行手がかり情報は色チャンネルにおいても輝度チャンネルと同程度の効率で伝達されると結論できよう。

ただし、運動視差に関しては、等輝度での奥行知覚の劣化が起こるようである。運動知覚が等輝度条件下で劣化することは多くの研究者が確認しており（たとえば、Cavanagh, Tyler, & Favreau, 1984; Cavanagh, Saida, & Rivest, 1995）、その影響とも考えられる。

２－３　奥行知覚と視覚神経経路との関係

Schiller, Logothetis, & Charles (1990)は、サルの脳の一部を破壊する実験によって、両眼網膜像差情報の処理機能をM系だけが担っているのではないことを示した。また、Ingling & Grigsby (1990)は、等輝度刺激を用いない実験で、絵画的奥行手がかり情報の処理をＰ系も担っている可能性を示した。Livingstone & Hubel (1987, 1988)は、M系の細胞が刺激の色の変化に応答しないので、等輝度条件下で劣化する知覚機能はM系に局在すると推論したが、Ingling & Grigsby (1990)はその論理を批判した。彼らは、Ｐ系の細胞は空間あるいは時間周波数の高い輝度の変化に応答することが知られているので、等輝度刺激での知覚の劣化は、その知覚機能がM系に局在する証拠にはならないと主張する。Ｐ、M両系とも明るさ情報を伝達するのなら、どちらが当該の知覚機能を担っていても、等輝度での劣化が起こりうるからである。

Livingstone & Hubel (1987, 1988)は、視覚神経系に関する解剖学的あるいは神経生理学的証拠から、奥行という視知覚属性あるいは対応する視覚情報処理が特定の神経経路（M 経路）に局在すると仮定した。しかし、神経生理学的証拠といっても単一細胞の応答特性に関するものであり、視覚神経系と視覚情報処理過程との対応関係を単純化しすぎた

きらいがある。明るさチャンネルや色チャンネルというのは心理物理学的証拠から推論された情報処理の流れであり、それが解剖学的、生理学的研究によって区別された神経経路と１対１の対応がつかねばならない理由はない。事実、序で紹介したDe Valois & De Valois (1993)のように、P、M両系に輝度情報の伝達機能を仮定する研究者も多い。限られた証拠から、知覚というこころの働きと神経系の構造や活動と結びつけることには慎重であるべきであろう。しかし、このことは、色チャンネル・輝度チャンネルの区別やそれらの視知覚、たとえば奥行知覚における役割の検討が無意味であることを意味しない。それらは、依然として視知覚の心理学的研究における重要なテーマである。

要約

本論文では、色が奥行知覚の成立において果たす役割を、二つの側面から検討した。その一つは、色自体が直接的に奥行知覚を生み出す、すなわち奥行手がかりとして働くという側面であった。第二は、他の諸々の奥行手がかりの情報を伝達するという側面であった。

第１章では、第１節で上記の目的を詳述した後、後の章での議論に必要な視知覚に関する基本的概念について簡単に解説した。第２節では、眼から視神経、外側膝状体を経由して大脳皮質視覚野に至る視覚神経系の解剖学的構造を取り上げ、第３節では、視覚神経系における情報伝達の生理学的なしくみを解説した。さらに、第４節で、主としてLivingstone & Hubel (1987, 1988)の主張に基づき、視覚系の3種の下位神経経路（M系、P系およびＰＢ系）が刺激に対して示す応答特性と視知覚の成立に果たす機能とを紹介した。第５節では、色覚のしくみについての3種の仮説（三色説、反対色説、段階説）や色覚の個人差について述べ、さらに視覚系における色情報の処理と明るさ情報の処理の独立性についても触れた。第６節では、刺激の色に関する属性を表現する方法や刺激の等輝度を実現する方法を紹介した。第７節では、距離や奥行の知覚が成立するための情報を提供する刺激特徴、すなわち奥行手がかりについて解説した。単眼網膜像に含まれるものとして絵画的手がかりと運動視差を、両眼性のものとして網膜像差を、また眼筋の活動に関連するものとして調節と輻輳を取り上げた。第８節では、大気による光の吸収や散乱のため同じ物でも距離のよって異なる色に見えるという大気遠近現象を紹介し、この現象を経験することによって色が奥行手がかりとして働くようになるという可能性を指摘した。そして、第９節で、属性

の異なる刺激領域が隣接する場合に、知覚上では各領域に異なる空間的性質が付与されるという、図と地の分化について解説した。最後の第１０節では、本論文の構成を説明した。

第２章では、色の持つ奥行手がかりとしての働き、いわゆる色の進出後退現象を取り上げ、現象論的あるいは心理物理学的観点から考察した。その際、色の三つの属性ごとに、奥行手がかりとしての有効性やその働きが成立するしくみを検討した。

第１節から第６節にかけては距離・奥行知覚への明るさの効果を取り上げた。

第１節では、まず、過去の諸研究を概観し、対象の明るさが効果を持つという点に関しては、ほとんどの研究が一致していることを示した。その効果は、背景との明るさの差違の大きな対象ほどより近く見える、と表現できるものであった。さらに、実験１で、暗黒中に二つの透過光刺激を提示し、より明るい方がより近く見えることを確認した。

第２節では、明るさの効果が生じるしくみに関する四つの仮説を検討した。第一の過去経験説は、大気遠近現象についての日常経験が色に奥行手がかりとしての機能を与えるという説であるが、反復経験の効果に否定的な研究が存在した。第二の瞳孔変化説は、対象の明るさにともなう瞳孔径の変化が奥行手がかりとなるという説であるが、背景が明るい場合には暗い対象ほどより近く見えるという事実と矛盾した。第三の両眼網膜像差説は、対象間の明るさの差違が両眼網膜像差を生むという説であるが、明るさの効果は両眼視でも単眼視でもほぼ同程度に生じるという報告と一致しなかった。

第四の見えの大きさ説は、明るさに応じて対象の見えの大きさが異なり、見えの大きさが奥行手がかりになるという説であった。対象の大きさが奥行手がかりとして働くことや明るさの差違が見えの大きさの差違を生むことには多くの証拠があり、この説は有力と考えられた。弱点は、明るい対象ほど大きく見えるのか、それとも背景との明るさの差違が大きい対象ほど大きく見えるのかという点で諸研究が一致しないことであった。もし後者の主張が正しければ、見えの大きさ説は距離知覚への明るさの効果に関する事実と一致するが、前者が正しければ、背景に関わりなく明るい対象ほど近く見えることが予測され、既知の事実と矛盾した。

そこで、第３節では見えの大きさ説をさらに詳しく検討した。まず、実験２で、暗黒中の透過光刺激においては、明るい対象ほど大きく見えることを確かめた。実験３では、対象に灰色色紙を用い、背景が黒でも白でも、明るい対象ほど大きく見えることを確かめた。さらに、実験４では、大きさと明るさの両方が異なる透過光刺激を暗黒中に提示し、より小さくかつより明るい対象がより近く見えうることを確かめた。そして、三つの実験の結果を総合して、見えの大きさ説は不十分であると結論した。

第４節では、上記の四つの仮説に替わるものとして、図－地知覚説と名付けた新しい仮説を提唱した。この仮説は、刺激の対象領域と背景領域とが知覚上で図と地の関係を形成し、図が地の前方に浮き出す程度が図領域と地領域の明るさの差違に依存することが対象間の見えの距離の差違となって現れる、というものであった。この仮説は、距離知覚への明るさの効果を否定したOyama & Yamamura(1960)の報告を検討することから生まれた。第４節では、まず彼らの実験を紹介し、続いて実験５で彼らのとほぼ同じ装置を用いて追試を行った。その結果、標準刺激面の見えの距離に対する明るさの効果の現れ方に顕著な個人差があり、

四つのタイプに分類できることが明らかになった。

そこで、被験者の内観報告を手がかりに、（1）標準刺激面と背景面が図－地関係をなし、その関係は反転しうる、（2）どちらが図になるかに関わりなく、両面の明るさの差が大きいほど図および地としての両面間の知覚的奥行が増す、（3）両面の図－地関係には個人差がある、（4）両面の図－地関係は個人内では比較的安定している、といった仮定を立てた。そして、これらの仮定に基づけば実験５の結果を説明できることを示した。実験６では実験５と同じ装置を用い、標準刺激面と背景面の間の見えの前後関係および見えの奥行量を測定して、これらの仮定を実証した。

さらに、これらの仮定を、（1）視野あるいは網膜像内の明るさの異なる隣接二領域は図－地関係をなし、図になった領域は地になった領域の前方に定位する、（2）どちらの領域が図になるかは図－地分化の一般的規則性にしたがい、条件によっては図－地関係が反転する、（3）どちらの領域が図になるかに関わりなく、領域間の知覚的奥行量は領域間の明るさの差違の増加にともなって増加する、と一般化した。そして、対象領域が背景領域よりはるかに小さい通常の刺激布置では、図－地知覚の一般的傾向にしたがって対象領域が知覚上で図として安定すると仮定すれば、距離知覚に対する明るさの効果一般を説明できることを示した。

第５節では、図－地知覚説の一般化された仮定が実証された。実験７では、図－地知覚の実験で用いられる刺激布置に似せて、実験５や６の標準刺激面と背景面の相当する隣接二領域を同一平面上に配置した。また、判断方法を変更し、両者の見えの前後関係を言語報告させた。その結果、両者の明るさの差違が大きいほど両者の間の奥行が明瞭であるこ

と、領域の手前に見えやすさと明るさとの関係は図－地反転図形における図になりやすさと明るさとの関係と類似していることが示された。

実験８、９では領域間の見えの前後関係と奥行量を言語報告させた。その結果、領域間の明るさの差が増すほど見えの奥行は大きく、領域間の前後関係については、個人差と個人内での安定性とが示された。

第６節では図－地知覚説の有効性がさらに検討された。まず、図－地知覚説から、従来知られていなかった新しいタイプの進出後退現象の可能性を演繹した。従来の研究で用いられてきた、距離知覚の対象領域が背景領域より小さい刺激布置に関して、図－地知覚説からは、対象領域は図となって背景領域の前方に、しかも背景との明るさの差違の大きい対象ほどより前方に定位し、それ故より近く見えることが予測された。一方、対象領域が地となる刺激布置では、背景領域との明るさの差が大きい対象領域ほど背景領域のより後方に定位し、それ故より遠く見えることが予測された。

この予測を検証するため実験１０と１１が実施された。実験１０では、従来の刺激布置に似せ、小さな対象領域が用いられた。それに対して、実験１１では、対象領域を大きくし、背景領域にきめを与えて、対象領域が地として知覚されやすい条件が設定された。その結果、実験１０では背景との明るさの差違が大きい対象ほどより近く見え、実験１１では逆により遠く見えることが示され、予測が実証された。そして、実験１１の結果は第２節で取り上げた四つの仮説のいずれをもってしても説明できないものであり、距離知覚に対する明るさの効果の説明としては、図－地知覚説が最も有効であると結論された。

第７～１４節では色相の効果が取り上げられた。

第７節では、単眼視の場合に対象の色相が距離知覚に影響しうるかど

うかが検討された。諸研究の結果は、長波長の対象ほどより近く見えるというものから、逆に短波長の対象がより近く見えるというものや対象の色相は見えの距離の差を生まないとするものまで様々であった。また、実験１２では、灰色背景上に明るさや彩度がほぼ等しい赤、緑、青の小さな対象を提示したが、見えの距離の明瞭な差違は見られなかった。これらより、単眼視の場合、距離知覚に対する色相の効果は存在しないか、あるとしてもきわめて弱いと結論された。

また、色相の効果がある場合に可能な説明として、眼球調節説と見えの大きさ説が紹介された。前者は、対象の色相あるいは波長に応じて眼の水晶体の調節が変化し、それが奥行手がかりとなるというものであった。後者は対象の見えの大きさが色相によって異なり、見えの大きさが奥行手がかりとなるというものであった。しかし、見えの大きさに対する色相の効果に関しても諸研究の結果は一致しなかった。さらに、図－地知覚説の適用可能性が示唆された。

第８節では両眼視での距離知覚に対する色相の効果が検討された。諸研究の結果はおおむね一致しており、この効果の現れ方は以下のようなものであった。（１）一般に、黒色背景では長波長の刺激ほどより近く見え、白色背景では短波長の刺激ほどより近く見える。（２）ただし、個人差があり、逆の傾向を示す例もある。（３）黒色背景の場合、刺激全体の明るさレベルが高いと長波長刺激が進出するが、明るさレベルが低いとその見えの奥行が減少したり、短波長刺激が進出したりする 。（４）波長の異なる刺激間の見えの奥行は両者の物理的奥行によって相殺できる。（５）黒色背景の場合、波長の異なる刺激間の見えの奥行は両者の波長差が大きいほど大きい。（６）波長の異なる刺激間の見えの奥行は観察距離が長いほど大きい。（７）黒色背景の場合、微小人工瞳

孔を用いると、両眼の人工瞳孔間の間隔が広いと長波長刺激が進出し、間隔が狭いと短波長刺激が進出する。（８）黒色背景の場合、波長の異なる刺激間の見えの奥行は人工瞳孔間距離に比例する。（９）黒色背景の場合、上記の人工瞳孔を用いた場合の見え方は、自然瞳孔観察の際の傾向や被験者の色覚に関わりなく一定である。

第９説では、Einthoven (1885)が提案した色収差説を紹介し、それが第８節で述べた色相の効果の大部分の特徴を説明できることを示した。この説は、眼球内の色収差と視軸と瞳孔中心との位置ずれとによって波長の異なる対象間に両眼網膜像差が生じ、それが奥行手がかりとして働くというものであった。また、背景が白色の場合は対象光の補色光または白色光から対象光を除いた残りの波長の光が対象の網膜像の位置を決定すると仮定された。しかし、この仮説では上記の（２）や（３）は説明できなかった。

次ぎに、この難点を克服するために Vos(1960, 1963, 1966)によって提唱された、スタイルズ・クロフォード効果を加味する修正説が紹介された。Einthoven (1885)の説では両眼網膜像差は瞳孔中心を通る光の結像位置によって決定されると仮定されたが、修正説では瞳孔におけるスタイルズ・クロフォード効果の極大または重心位置を通過する光の結像位置が両眼網膜像差を決定すると仮定された。そして、スタイルズ・クロフォード効果の個人差が色相の効果の個人差の原因であるとした。また、刺激の明るさレベルが変化すると瞳孔径が変化し、それにともなってスタイルズ・クロフォード効果の寄与が変化するため、色相の効果が変化するとした。

第１０節では、色収差説の検証を試みた諸研究を概括した。それらの結果のほとんどが修正された色収差説を支持するものであった。

第１１節では、色収差説を否定する研究として、第４節でも取り上げたOyama & Yamamura(1960)の研究を紹介した。彼らは、暗所視の場合や二色型色覚者において色相の効果が消えることを根拠に、色収差説を否定した。また、第８節で紹介した研究と異なり、背景の黒白に関わりなく赤い対象面が青い対象面より近く見えると報告した。

第１２節では、明るさの効果に関して提案された図－地知覚説が、色相の効果に関するOyama & Yamamura(1960)の結果にも適用可能かどうかが検討された。まず、実験５の装置を用いてOyama & Yamamura(1960)の追試を行い、実験１３では明所視で常に赤が進出することを、実験１４では暗所視でそのような色相の効果が見られないことを確認した。

そして、図－地知覚説の基本仮定に、（１）無彩色に対して赤系統の色は青系統の色より図になりやすい、（２）無彩色領域と有彩色領域とが隣接する場合、どちらが図となって前方に定位するかに関わりなく、両者間の見えの奥行量は赤系統の色の方が大きい、のいずれかの仮定を追加すれば、Oyama & Yamamura(1960)の結果や実験１３、１４の結果が説明できることを示した。そして、実験１５と１６で、これらの仮定が検証された。

実験１５では、実験６の装置と手続を用い、背景面を白または黒、標準刺激面を明るさがほぼ等しい赤または青とした。その結果、赤の方が背景面より前方に見えやすく、見えの奥行量もわずかに大きかった。これにより、両仮定とも実証された。ただし、用いられた赤が青より彩度が高かったため、仮定（２）には疑念が残った。そこで、実験１６では、実験９の装置と手続を用い、一方の領域を白、灰、黒とし、他方の領域を明るさだけでなく彩度もほぼ等しい赤、緑、青とした。また、有彩色

の領域同士を隣接させる条件も設定した。その結果、より前方と見られる率は赤＞緑＞青の順となった。しかし、無彩色と隣接する条件では、3種の色相間で見えの奥行量に差はなかった。これらより、仮定（１）が採用されるべきと結論された。

第１３節では、１２節を受けて、Oyama & Yamamura(1960)の結果には図－地知覚説が有効であると結論された。一方、実験１６の結果と図－地知覚説からは、通常の刺激布置においては対象の色相が異なっても見えの距離に差は生じないことが予測されたが、この予測は第８～１０節で紹介した多数の研究結果と明らかに矛盾するものであった。そこで、両眼視での距離知覚に対する色相の効果一般には、図－地知覚説は有効でなく、色収差説を適用すべきと結論された。

第１４節では、背景も有彩色の場合の色相の効果が取り上げられた。数少ない研究は背景との色相上の差違の大きい対象ほどより近く見えることを示唆した。実験１７では実験１２と同じ装置と手続を用い、対象領域は明るさと彩度がほぼ等しい赤、緑、青とし、背景領域は対象領域と同じ明るさでやや彩度の高い赤、緑、青とした。その結果、背景との差違の大きい対象ほどより近く見える傾向が確認された。

この効果を説明可能な仮説として、見えの大きさ説と図－地知覚説が検討された。見えの大きさに対する背景－対象間の色相の差違の効果については諸研究の結果が一致せず、見えの大きさ説の有効性については結論が出せなかった。実験１６の有彩色同士の条件では、赤と青あるいは赤と緑の組合せにおける見えの奥行量が、緑と青の組合せにおける見えの奥行量より大きかった。この結果と図－地知覚説を組み合わせると、実験１７の結果が説明できること、したがって背景と対象がともに有彩色の場合の色相の効果一般を図－地知覚説で説明可能であることが示さ

れた。

第１５節では彩度の効果が検討された。この場合も研究例は少ないが、背景との彩度の差違の大きい対象ほどより近く見えることが示唆された。また、Oyama & Yamamura (1960)は、赤の場合は彩度が増すほど見えの距離が減少し、青の場合は増加すると報告した。実験１８では、実験１７と同じ装置や手続を用い、背景領域を灰色、赤、緑、青とした。対象領域には各有彩色背景と色相と明るさが等しく彩度が低い2色、および背景よりやや明るい灰色が用いられた。その結果、どの色相においても、背景との彩度差の大きい対象ほどより近く見える傾向が確認された。

この傾向を説明可能な仮説として、見えの大きさ説、過去経験説および図－地知覚説が検討された。見えの大きさ説に関しては、対象の彩度は見えの大きさに効果を持たない、あるいは無彩色背景上では彩度が低いほど大きく見えるという報告があることから、不適切と結論された。過去経験説についても、実験１７の有彩色背景条件には適合しないと結論された。図－地知覚説については、（１）隣接領域のどちらが図となって前方に定位するかに関わりなく、両領域間の見えの奥行量は両者間の彩度差にともなって増加する、と仮定すると彩度の効果一般を説明でき、（２）赤系統の色では彩度が高いほど無彩色に対して図になりやすく、青系統の色では地になりやすい、と仮定するとOyama & Yamamura (1960)の結果が説明できることが示された。

実験１９では、実験１６と同じ装置と手続が用いられ、全て明るさの等しい2種の彩度の赤、緑、青に灰色を加えた7色中の2色が隣接させられた。その結果、上記の仮定（１）と（２）が実証された。そして、図－地知覚説は彩度の効果一般に対して有効であると結論された。

第３章では、色の第二の働き、すなわち奥行情報伝達の働きを取り上

げた。その際、刺激における明るさの分布に関連した情報と色の分布に関連した情報とは異なる視覚情報処理の流れの中にあるとする観点に立ち、色が伝達する情報の奥行知覚への寄与の有無、あるいは明るさが伝達する情報と比べての有効性の程度を検討した。

第１節では、等輝度刺激を用いた奥行知覚の研究を概括した。まず、等輝度条件下では奥行知覚があらゆる面で阻害されると報告したLivingstone & Hubel (1987, 1988)の研究を紹介した。彼らは、視覚神経系の細胞の応答特性に関する知見に基づいて、等輝度刺激に対しては奥行知覚は生じえないと推測した。そして、CRT画面上に等輝度の赤と緑で刺激図形を描き、この推測を例証した。彼らは、ランダムドットステレオグラム、図形ステレオグラム、絵画的奥行手がかり、運動視差などによる奥行知覚が全て消失すると主張した。

次ぎに、等輝度のランダムドットステレオグラムによる奥行知覚を取り上げた諸研究を紹介した。それらの結果は以下のようなものであった。

（１）等輝度で奥行知覚が消失あるいは劣化するという研究と維持されるという研究とが相半ばし、判断課題や輝度差の条件などによって結果が異なる。（２）奥行の有無や奥行方向の判断をさせる場合より、奥行量や形態の判断をさせる場合の方が、等輝度条件での劣化が見出されやすい。（３）要素間の輝度差を細かく変化させると、奥行の知覚されない輝度差条件が見つかる。（４）奥行の知覚されない輝度差条件や奥行知覚の鮮明さは刺激を構成する色の組合せによって異なる。（５）要素間の対応づけに関しては色情報が利用されている。（６）色情報の有効性に関して個人差がある。（７）等輝度条件下の奥行知覚は色収差によるものではない。

続いて、図形ステレオグラムによる奥行知覚を取り上げた諸研究を紹

介した。それらの結果は以下のようなものであった。（1）奥行知覚の消失を報告した研究は、Livingstone & Hubel (1987, 1988)以外にはない。（2）ただし、奥行知覚は等輝度でも維持されるが、輝度差がある場合に比べて劣化するという報告がある。（3）奥行知覚の精度は刺激を構成する色の組合せによって異なる。（4）等輝度条件下の奥行知覚は色収差によるものではない。

さらに、絵画的奥行手がかりや運動視差による単眼性の奥行知覚に関する研究が紹介された。絵画的手がかりに関しては、ほとんどの研究が等輝度での奥行知覚の維持を報告した。ただ、運度視差に関しては等輝度での劣化が報告された。

第2節では、図形ステレオグラムによる奥行知覚に対する図形と背景との色差および輝度差の効果を、反応時間を指標として実験的に検討した。刺激は白色面を単色光で照射して作り出された。等輝度設定方法に関するLivingstone & Hubelの批判を考慮して、図形の直径を小さくした（0.4°）。図形は背景に対して5´の交差および非交差網膜像差を与えられており、被験者の課題は図形が背景の前に見えるか後ろに見えるかを対応するキーを押して報告することであった。

実験1では、背景の波長が500nm、輝度が2.7cd/m^{2}であった。図形の波長は630、580、480nmで、輝度は背景に対する等輝度値を中心に、その0.87、0.91、0.95、1.05、1.10、1.15倍の7種の値が用いられた。その結果、全般に、図形の波長が長いほど反応時間は短かった。また、図形と背景間の輝度差が小さいほど反応時間は長かった。ただし、この輝度差の効果は図形の波長が長いほど不明瞭であった。

実験2では、実験1の結果が、奥行知覚の効率が図形と背景の間の波長差に依存することを示すのか、それとも波長の特定の組合せへの依存

性を示すのかを検討した。そのために、背景の波長を480nmにし、図形の波長を580nmと630nmにした。その結果、630nmの方が反応時間が短かかったが、いずれの波長においても一貫した輝度の効果は見られなかった。そして、実験1、2の結果から、奥行の見えやすさは刺激を構成する領域間の波長差に依存すると結論された。

第3節では、奥行が知覚されない輝度範囲を指標として、図形ステレオグラムによる奥行知覚の図形－背景間の波長差への依存性がさらに検討された。実験1、2と同じ装置が用いられたが、提示時間がサッケードの停留時間より短くされた（50ms）。図形は背景に対して5´の交差網膜像差を与えられており、被験者の課題は図形が背景の前に見えるか否かを対応するキーを押して報告することであった。背景の輝度を固定し図形の輝度をわずかずつ上げるか、または下げるかして、そのたびに被験者に判断を求め、図形－背景間に奥行が知覚されない輝度範囲を測定した。

実験3では、背景の波長は500nmで輝度は1.6cd/m^{2}であった。図形の波長は460 ～600nmの間、または460 ～560nmの間に10nm間隔で設定された。その結果、図形と背景の間の波長差が大きくなるほど奥行の知覚されない輝度範囲が縮小する傾向が見られた。ただし、図形の波長が最も短い460nmの条件では奥行の知覚されない輝度範囲がわずかに拡大した。

実験4では、実験3で示唆された、奥行知覚が波長差だけでなく特定の波長の組合せにも依存する可能性が検討された。背景の波長は480、500、580、630nmおよび白色で、輝度は1.5cd/m2であった。図形の波長は460 ～630nmの間に10nm間隔で18種類が設定された。その結果、背景が単波長光の場合、いずれの波長においても、図形と背景間の波長差

が大きくなるほど奥行の知覚されない輝度範囲が単調に縮小する傾向が得られた。これにより、実験１、２での結論が支持された。白色背景の結果は580nm の背景の結果に類似しており、570nm 付近にピークを持つ単調な傾向が見られた。ただ、500～520nm 付近で奥行の知覚されない輝度範囲がわずかに拡大した。

第４節では、実験１～４の結果を受けて、局所的立体視機構が色情報を利用でき、しかもその効率は刺激を構成する波長差にともなって増大すると結論された。また、波長差と輝度差との間に一種のトレードオフが見られたことから、色情報と明るさ情報とが加算された後に単一の両眼立体視機構に入力される可能性が指摘された。

第５節では、幾何学的錯視の測定を通じて、絵画的奥行手がかりによる奥行知覚への色情報の寄与が間接的に検討された。まず、幾何学的錯視を利用することの背景として、錯視の遠近法説を解説した。これは、ある種の幾何学的錯視図形には絵画的奥行手がかりが含まれており、それが大きさの恒常性のしくみを作動させることによって錯視が生じると仮定するものであった。

次ぎに、Livingstone & Hubel (1987, 1988)の報告を紹介した。彼らは、絵画的奥行手がかりを含むと考えられる Ponzo 図形、Müller-Lyer 図形などを等輝度の赤と緑で描いた場合には錯視は生じないことを示し、奥行手がかりが機能しないことが原因であると主張した。続いて、等輝度条件下での幾何学的錯視を扱った諸研究を概括した。それらは全て、等輝度でも輝度差がある場合と同様に錯視が生じることを報告するものであった。

そこで、Livingstone & Hubel (1987, 1988)と他の研究との方法上の差違を検討した。そして、他の研究に対する彼らの方法論上の批判に答

え、また彼ら自身の研究の方法論上の難点を克服するために、実験５において、図形と背景との輝度関係として等輝度だけでなく輝度差のある条件を複数設定し、錯視量への影響を調べなおした。さらに、線遠近法パタンを含むと見なされる図形と含まないと見なされる図形との比較を行い、等輝度条件下での絵画的奥行手がかりの有効性を検討した。

実験５では、Müller-Lyer 図形、Ponzo 図形、分割距離錯視図形および垂直水平錯視図形が、CRT 画面上に、背景を緑、図形を赤として描かれた。Müller-Lyer 図形と Ponzo 図形は絵画的奥行手がかりのうちの線遠近法パタンを含み、分割距離錯視図形と垂直水平錯視図形は含まないと仮定された。背景の輝度は固定され、図形の輝度は背景に対する等輝度値を中心に、その上下に対数値にして0.05の間隔で6種類ずつ、計13の条件が設定された。その際、図形や背景の輝度は MDB 法を用いて標準の白色面の輝度に換算され、換算された値が等しいことを等輝度と定義した。

その結果、いずれの図形においても、従来知られている通りの錯視が生じ、図形と背景の輝度差に関わりなく錯視量は一定であった。この結果や絵画的奥行手がかりの有効性を直接検討した諸研究の結果を踏まえ、絵画的奥行手がかりに基づく奥行知覚は等輝度状況下でも十分に有効であると結論された。

第４章では、まず、第２章の議論を受け、色は三属性の全てにおいて奥行手がかりとして働くと結論された。そして、それらの働きの根底には2種類のしくみが存在すると結論された。一つは、色収差説が主張するもので、眼球の色収差および視軸と瞳孔中心との位置ずれが生み出す両眼網膜像差に基づく両眼立体視であった。もう一つは、図－地知覚説が主張するもので、色の異なる刺激領域間の図と地の分化という視知覚の

基本的属性そのものであった。

次ぎに、第３章の議論を受け、局所的と全体的の区別に関わりなく両眼立体視機構は色情報を利用できる、あるいは色チャンネルは両眼網膜差情報を伝達できると結論された。さらに、今後検討すべき課題として、（１）明るさ情報に比べて色情報の利用効率が低いことの原因、（２）色情報の利用に関する局所的立体視と全体的立体視との差違、（３）立体視における色情報と明るさ情報との独立性、（４）色覚機構と両眼立体視機構との関係の詳細、が指摘された。また、絵画的奥行手がかり情報は色チャンネルにおいても輝度チャンネルと同程度の効率で伝達されると結論された。

謝辞

本論文前半部の研究を始めたのは25年前のことである。著者のものぐさ癖のために放置されていた本論文を完成できたのは、多くの方々のご指導とご鞭撻のおかげである。以下に記して深くお礼を申し上げたい。

国際医療福祉大学の今井四郎教授は、先延ばしを図る著者を叱咤し、論文完成の決意と構想を固めさせてくださった。大阪市立大学の上野雄宏教授には、本論文前半部の諸実験を雑誌論文として公表する際にご指導いただいた。本論文後半部の諸実験の共同研究者でもある千葉大学の御領謙教授には、様々な面でひとかたならぬお世話になった。また、千葉大学の上村保子教授、宮埜寿夫教授、矢口博久教授、塩入諭助教授からは、本論文の内容に関して有益な助言をいただいた。

引用文献

Ashley, M. L. 1898 Concerning the significance of intensity of light in visual estimate of depth. Psychological Review, 5, 595-615.

Baumann, C. 1994 Small chromaticity differences and stereopsis. Perception, 23(Suppl.), 37.

Baumann, C. 1997 Colour as input to stereopsis. Perception, 26 (Suppl.), 31.

Bevan, W. & Dukes, W. F. 1952 Color as a variable in the judgment of size. American Journal of Psychology, 66, 283-288.

Cavanagh, P. 1987 Reconstructing the third dimension: Interactions between color, texture, motion, binocular disparity, and shape. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 37, 171-195.

Cavanagh, P. 1989 Multiple analyses of orientation in the visual system. In D. M. Lam & C. D. Gilbert (Eds.) Neural Mechanisms of visual perception. Woodland, TX: Portfolio Publishing. Pp. 261-279.

Cavanagh, P. 1991 Vision at equiluminance. In J. J. Kulikowski, V. Walsh, & I. J. Murray (Eds.) Vision and visual dysfunction. Vol. 5. Limits of vision. London: Macmillan, Pp. 234-250.

Cavanagh, P., Sida, S., & Rivest, J. 1995 The contribution of color to depth perceived from motion parallax. Vision Research, 35, 1871-1878.

Cavanagh, P., Tyler, C. W., & Favreau, O. E. 1984 Perceived velocity of moving chromatic gratings. Journal of the Optical Society of America, A1, 893-899.

Cohen, W. 1957 Spatial and textural characteristics of the Ganzfeld. American Journal of Psychology, 70, 403-410.

Cohen, W. 1958 Color-perception in th chromatic Ganzfeld. American Journal of Psychology, 71, 390-394.

Comerford, J. P. 1974 Stereopsis with chromatic contours. Vision Research, 14, 975-982.

Coren, S. & Girgus, J. S. 1978 Seeing is deceiving: The psychology of visual illusions. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Dengler, M. & Nitschke, W. 1993 Color stereopsis: A model for depth reversal based on border contrast. Perception & Psychophysics, 53, 150-156.

DeValois, R. L. & DeValois, K. K. 1975 Neural coding of color. In E. C. Carterette & M. P. Friedman (Eds.) Handbook of perception Ⅴ: Seeing. New York: Academic Press. Pp. 117-166.

DeValois, R. L. & DeValois, K. K. 1993 A multi-stage color model. Vision Research, 33, 1053-1065.

Ebert, P. C. & Pollack, R. H. 1972 Magnitude of the Mueller-Lyer illusion as a function of hue, saturation, and fundus pigmentation. Psychonomic Science, 26, 225-226.

海老原直邦 1973 奥行知覚における大きさおよび明るさの効果 日本心理学会第37回大会発表論文集, 646-647.

海老原直邦 1974 奥行知覚における明るさの効果 日本心理学会第38回大会発表論文集, 242-243.

Einthoven, W. 1885 Stereoscopie dürch Farbendifferenz. Graefes

Archiv fur Ophthalmologie, 31, 211-238.

江草浩幸　1977a　距離判断に及ぼす明るさの効果　関西心理学会第89回大会発表論文集，12.

江草浩幸　1977b　色の進出後退現象について　心理学評論，20，369-386.

江草浩幸　1977c　図と地の間の奥行感について　人文論叢（大阪市立大学大学院文学研究科紀要），5・6合併号，38-46.

江草浩幸　1981　距離知覚に及ぼす彩度の効果　関西心理学会第93回大会発表論文集，6.

Egusa, H.　1982　Effect of brightness on perceived distance as a figure-ground phenomenon.　Perception, 11, 671-676.

Egusa, H.　1983　Effects of brightness, hue, and saturation on perceived depth between adjacent regions in the visual field.　Perception, 12, 167-175.

江草浩幸　1984　色の進出後退現象について　第21回知覚懇話会（報告）.

江草浩幸・御領謙　1993　両眼立体視に対する刺激波長の影響　関西心理学会第105回大会発表論文集，69.

江草浩幸・御領謙　1994　両眼立体視に対する刺激波長の影響（2）　基礎心理学研究，13，54（抄録）.

Egusa, H. & Goryo, K.　1996　The role of color and luminance in stereoscopic depth perception.　International Journal of Psychology, 31(Abstracts of 26th internatinal Congress of Psychology), 415.

江草浩幸・御領謙　1998　幾何学的錯視に対する図形と背景の輝度差の効果　国際医療福祉大学紀要，3，71-78.

Epstein, W. & Landauer, A. A.　1969　Size and distance judgments under reduced condition of viewing.　Perception & Psychophysics, 6, 269-272.

Erning, L. Th. O. van, Gerrits, H. J. M., & Eijkman, E. G. J.　1988　Apparent size and receptive field properties.　Vision Research, 28, 407-418.

Farnè, M.　1977　Brightness as an indicator to distance: Relative brightness per se or contrast with the background.　Perception, 6, 287-293.

Faubert, J.　1994　Seeing depth in colour: More than just what meets the eyes.　Vision Research, 34, 1165-1186.

Faubert, J.　1995　Colour induced stereopsis in images with achromatic information and only one other colour.　Vision Research, 35, 3161-3167.

Favreau, O. E. & Cavanagh, P.　1981　Color and luminance: Independent frequency shifts.　Science, 212, 831-832.

Frish, H. L. & Julesz, B.　1966　Figure-ground perception and random geometry.　Perception & Psychophysics, 1, 389-398.

Gibson, J. j. & Dibble, F. N.　1952　Exploratry experiments on the stimulus conditions for the perception of a visual surface.　Journal of Experimental Psychology, 43, 414-419.

ゲーテ J. W. V.　石原純・島地威雄（訳）　1942　色彩論　ゲーテ全集第17巻　大東出版　（Göthe, J. W. V.　1810　Zur Farbenlehre）

Gregory, R. L.　1963　Distortion of visual space as inappropriate constansy scaling.　Nature, 199, 678-680.

Gregory, R. L. 1968 Visual illusion. Scientific American, 219(5), 66-76.

Gregory, R. L. 1977 Vision with isoluminant colour contrast: 1. A projection technique and observations. Perception, 6, 113-119.

Grinberg, D. L. & Williams, D. R. 1985 Stereopsis with chromatic signals from the blue-sensitve mechanism. Vision Research, 25, 531-537.

Grünberg, V. 1906 Über die scheinbare Verschiebung zwischen zwei verschiedenfarbigen Flächen im durchfallenden diffusen Lichte. Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinneorgane, 42, 10-21.

萩野源一 1971 大きさの手掛かりが見えの距離に及ぼす影響について 高木貞二（編） 現代心理学の課題 東京大学出版界 Pp. 102-115.

萩野源一・西野泰広 1979 刺激の明るさが見えの距離に及ぼす影響 (1) 日本心理学会第43回大会発表論文集, 130.

Hartridge, H. 1950 Recent advance in the physiology of vision. London: Churchill.

Helmholtz, H. von 1962 Helmholtz's treatise on physiological optics. (Ed. by J. P. C. Southall) New York: Dover Publications. (Handbuch der physiologischen Optik. dritte Aufl. 1909 Hamburg: Leopold Voss.)

Higashiyama, A. 1979 The perception of size and distance under monocular observation. Perception & Psychophysics, 26, 230-234.

東山篤規 1994 空間知覚 大山正・今井省吾・和気典二（編） 新編感覚・知覚心理学ハンドブック 誠信書房 Pp. 768-801.

Holway, S. H. & Boring, E. G. 1940 The dependence of apparent visual size upon illumination. American Journal of Psychology, 53, 587-589.

Hubel, D. H. & Wiesel, T. N 1968 Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. Journal of Physiology, 195, 215-243.

市原茂・北川智利 1999 面の進出と後退について ランダムドットパターンを用いて 日本心理学会第63回大会発表論文集, 395.

飯田健夫・元木正典・大山正 1976 色光の進出・後退現象 その３－眼球調節の測定－ 日本心理学会第40回大会発表論文集, 395.

Ingling, C. R. Jr & Grigsby, S. S. 1990 Perceptual correlates of magnocellular and parvocellular channels: Seeing form and depth in afterimages. Vision Research, 30, 823-828.

Ishak, I. G. H., Said, F. S., & Abd-Elsalam, F. 1969 Colour stereoscopy. Optica Acta, 16, 69-74.

Isono, H. & Yasuda, M. 1988 Stereoscopic depth perception of isoluminant color random-dot stereograms. Systems and Computers in Japan, 19, 32-40.

Ittelson, W. H. 1960 Visual space perception. New York: Springer.

Jimenez, J. M., Rubino, M., Hita, E., & Del Barco, L. J. 1997 Influence of the luminance and opponent chromatic channels on stereopsis with random-dot stereograms. Vision Research, 37, 591-596.

Jordan, J. R., Geisler, W. S., & Bovik, A. C. 1990 Color as a

source of information in the stereo correspondence process. Vision research, 30, 1955-1970.

Julesz, B 1971 Foundations of Cyclopean Perception. Chicago: University of Chicago Press.

Kaiser, P. K., Herzberg, P. A., & Boynton, R. M. 1971 Chromatic border distinctness and its relation to saturation. Vision Research, 11, 953-968.

金子隆芳 1988 色彩の科学 岩波書店

金子隆芳 1990 色彩の心理学 岩波書店

金子隆芳・富家直・長谷川敬・冨田正利・千々岩英彰・齋藤美穂 1998 色の心理学 日本色彩学会（編） 新編色彩科学ハンドブック第2版 東京大学出版会 Pp. 351-393.

Kingdom, F. A. A. & Simmons, D. R. 1996 Stereoacuity and colour contrast. Vision Research, 36, 1311-1319.

Kingdom, F. A. A. & Simmons, D. R., & Rainville, S. 1999 On the apparent collapse of stereopsis in random-dot-stereograms at isoluminance. Vision Research, 39, 2127-2141.

Kishto, B. N. 1965 The colour stereoscopic effect. Vision Research, 5, 313-329.

Koffka, K. 1935 Principles of Gestalt Psychology. London: Routledge and Kegan Paul.

Li, C. & Guo, K. 1995 Measurements of geometric illusions, illusory contours and stereo-depth at luminance and colour contrast. Vision Research, 35, 1713-1720.

Livingstone, M. S. 1996 Differences between stereopsis,

interocular correlation and binocularity. Vision Research, 36, 1127-1140.

Livingstone, M. S. & Hubel, D. H. 1987 Psychological evidence for separate channels for the perception of form, color movement, and depth. Journal of Neuroscience, 7, 3416-3468.

Livingstone, M. S. & Hubel, D. H. 1988 Segregation of form, color, movement, and depth: Anatomy, physiology, and perception. Science, 240, 740-749.

Loewenstein, A. & Donald, G. 1941 A color stereoscpic phenomenon. Archives of Opthalmology, 26, 553-564.

Lu, C. & Fender, D. H. 1972 The interaction of color and luminance in stereoscopic vision. Investigative Ophthalmology, 11, 482-490.

Luckiesh, M. 1918 On "retiring" and " advancing" colors. American Journal of Psychology, 29, 182-186.

増田直衛・元木正典 1975 色光の進出・後退現象 その2 日本心理学会第39回大会発表論文集，127.

増田直衛・元木正典 1976 色光の進出・後退現象 その４－両眼視差の検討－ 日本心理学会第40回大会発表論文集，397.

増田直衛・元木正典 1977 色光の進出・後退現象 その５－遠距離に色光が単独提示される場合－ 日本心理学会第41回大会発表論文集，218.

Mount, G. E., Case, H. W., Sanderson, J. W., & Brenner, R. 1956 Distance judgment of colored objects. Journal of General Psychology, 55, 207-214.

元木正典・大山正　1975　色光の進出・後退現象　その１　日本心理学会第39回大会発表論文集，126.

Natsoulas, T.　1963　On homogeneous retinal stimulation and the perception of depth.　Psychological Bulletin, 60, 385-390.

Oshima, M., Kuroe, T., Endo, K., Hase, S., & Yamanaka, H.　1952　Influence of colour on the judgment of size.　Report of institute of Science of labour, No. 46, 8-11.

Osuobeni, E. P.　1991　Effect of chromatic aberration on isoluminance stereothreshold.　Optometry and Vision Science, 68, 552-555.

Osuobeni, E. P. & O'Leary, D. J.　1986　Chromatic and luminance difference contribution to stereopsis.　American Journal of Optometry & Physiological Optics, 63, 970-977.

Over, R.　1962　Stimulus wavelength variation and size and distance judgements.　British Journal of Psychology, 53, 141-147.

Owens, D. A. & Leibowitz, H. W.　Chromostereopsis with small pupils.　Journal of the Optical Society of America, 65, 358-359.

大山松次郎・暈善太郎　1934　電燈の進出色現象　照明学会誌，16，220-233.

Oyama, T.　1960　Figure-ground dominance as a function of sector angle, brightness, hue, and orientation.　Journal of Experimental Psychology, 60, 299-305.

大山正　1969　図と地の知覚　和田陽平・大山正・今井省吾（編）　感覚・知覚心理学ハンドブック　誠信書房　Pp. 460-477.

Oyama, T.　1974　Perceived size and perceived distance in stereoscopic vision and an analysis of their causal relation.　Perception & Psychophysics, 16, 175-181.

大山正　1994　色彩心理学入門　ニュートンとゲーテの流れを追って　中央公論社

Oyama, T. & Anzai, C.　1973　A further study on the effects of hue and luminance on the size perception.　Acta Chromatica, 2, 164-169.

Oyama, T. & Nanri, R.　1960　The effects of hue and brightness on the size perception.　Japanese Psychological Research, 2, 13-20.

大山正・笹本至心　1957　図－地反転の実験的研究　－短時間露出における明度、明度差、面積の効果　心理学研究，28，18-27.

Oyama, T. & Yamamura, T.　1960　The effect of hue and brightness on the depth perception in normal and color-blind subjects.　Psychologia, 3, 191-194.

大頭仁　1975　眼球の光学　生理光学－眼の光学と視覚－　朝倉書店.

Pillsbury, W. B. & Schaeffer, B. R.　1937　A note on 'advancing and retreating' colors.　American Journal of Psychology, 49, 126-130.

Pollack, R. H.　1970　Mueller-Lyer illusion: Effect of age, lightness contrast, and hue.　Science, 170, 93-95.

Pollack, R. H. & Jaeger, T. B.　1991　The effect of lightness contrast on the colored Müller-Lyer illusion.　Perception & Psychophysics, 50, 225-229.

Put, M. J. H & de Weert, C. M. M.　1997　Completion under isoluminance.　Perception, 26(Suppl.), 43.

Ramachandran, V. S., Rao, V. M., & Vidyasagar, T. R.　1973

The role of contours in stereopsis. Nature, 242, 412-414.

Robinson, E. J. 1954 The influence of photometric brightness on judgments of size. American Journal of Psychology, 67, 464-474.

Rohaly, A. M. & Wilson, H. R. 1993 The role of contrast in depth perception. Investigative Ophthalmology and Visual Science, 34, 1190.

Ross, H. E. 1967 Water, fog and the size-distance invariance hypothesis. British Journal of Psychology, 58, 301-313.

Ross, H. E. 1993 Aerial perspective and adaptation of distance estimates. Perception, 22(Suppl.), 10.

Scharff, L. V. & Geisler, W. S. 1992 Stereopsis at isoluminance in the absence of chromatic aberration. Journal of the Optical Society of America, A9, 868-876.

Schiller, P. H., Logothetis, N. K., & Charles, E. R. 1990 Functions of the colour-opponent and broad-band channels of the visual system. Nature, 343, 68-70.

Simmons, D. R. & Kingdom, F. A. A. 1994 Contrast thresholds for stereoscopic depth identification with isoluminant and isochromatic stimuli. Vision Research, 34, 2971-2982.

Simmons, D. R. & Kingdom, F. A. A. 1995 Differences between stereopsis with isoluminant and isochromatic stimuli. Journal of the Optical Society of America, A12, 2094-2104.

Simmons, D. R. & Kingdom, F. A. A. 1997 On the independence of chromatic and achromatic stereopsis mechanisms. Vision Research, 37, 1271-1280.

Schor, C. M. & Howarth, P. A. 1986 Suprathreshold stereo-depth matches as a function of contrast and spatial frequency. Perception, 15, 249-258.

Simonet, P. & Campbell, C. W. 1990 Effect of illuminance on the directions of chromostereopsis and transverse chromatic aberration observed with natural pupils. Ophthalmic and Physiological Optics, 10, 271-279.

Stuart, G. W., Edwards, M., & Cook, M. L. Colour inputs to random-dot stereopsis. Perception, 21, 717-729.

Sundet, J. M. 1972 The effect of pupil size variations on the colour stereoscopic phenomenon. Vision research, 12, 1027-1032.

Sundet, J. M. 1976 Two theories of colour stereoscopy An experimental investigation. Vision research, 16, 469-472.

Sundet, J. M. 1978 Effects of colour on perceived depth. Scandinavian Journal of Psychology, 19, 133-143.

高崎宏 1975 眼球光学系の光学特性に立脚した、進出後退色現象の研究 日本心理学会第39回大会発表論文集，S7.

高崎宏・加藤正明 1974 色による進出後退現象 光学，3，360-366.

玉池純朗 1935 視野の構造による現象的大きさの変化について－主として色の関係に於て－ 心理学研究，10，745-755.

Taylor, I. L. & Sumner, F. C. 1945 Actual brightness and distance of individual colors when their apparent distance is held constant. Journal of Psychology, 19, 79-85.

Tedford Jr., W. H., Bergquist, S. L., & Flynn, W. E. 1977 The size-color illusion. Journal of General Psychology, 97, 145-149.

Thompson, P. & Stone, R. 1993 Chromostereopsis: The relative contributions of colour and luminance to perceived depth. Perception, 22(Suppl.), 10.

Troscianko, T., Montagnon, R., Clerc, J. L., Malbert, E., & Chanteau, P. 1991 The role of colour as a monocular depth cue. Vision Research, 31, 1923-1930.

内川恵二 1994 色の弁別 大山正・今井省吾・和気典二（編） 新編感覚・知覚心理学ハンドブック 誠信書房 Pp. 414-425.

Verhoeff, F. H. 1928 An optical illusion due to chromatic aberration. American Journal of Ophthalmology, 11, 898-900.

山上暁・牧野達郎 1982 幾何学的錯視の遠近法理論．サイコロジー, No. 29, 21-29.

山下俊郎 1928 所謂「進出色」の現象に就いて 心理学研究, 3, 457-510.

Vos, J. J. 1960 Some new aspects of color stereoscopy. Journal of the Optical Society of America, 50, 785-790.

Vos, J. J. 1963 An antagonistic effect in color stereoscopy. Ophthalmologia, 142, 442-445.

Vos, J. J. 1966 The color stereoscopic effect. Vision Research, 6, 105-106.

Wald, G. & Brown, P. K. 1965 Human color vision and color blindness. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, 30, 345-359. (Goldstein, E. B. 1989 Sensation and perception 3rd ed. Wadsworth Publishing による)

de Weert, C. M. M. 1979 Colour contours and stereopsis. Vision Research, 19, 555-564.

de Weert, C. M. M. & Sadza, K. J. 1983 New data concerning the contribution of colour differences to stereopsis. In J. D. Mollon & L. T. Sharpe (Eds.), Colour vision: Physiology and psychophysics. London: Academic Press. Pp. 553-562.

de Weert, C. M. M., Snoeren, P. R., & Puts, M. J. H. 1998 Mutual dependence of luminance, size, and disparity in depth, size, and luminance discremination tasks. Perception, 27(Suppl.), 111.

Winn, B., Bradley, A., Strang, N. C., McGraw, P. V., & Thibos, L. N. 1995 Reversals of the colour-depth illusion explained by ocular chromatic aberration. Vision Research, 35, 2675-2684.

安井庸之介 1956 色の進出性に関する実験的研究（2） 日本心理学会第20回大会発表論文集, 69-70.

Ye, M., Zhang, X., Bradley, A., & Thibos, L. 1989 Chromostereopsis: The interaction of transverse chromatic aberration, axial chromatic aberration and the Stiles-Crawford effect. Investigative Ophthalmology and Visual Science, 30(Suppl.), 507.

Ye, M., Bradley, A., Thibos, L., & Zhang, X. 1991 Interocular differences in transverse chromatic aberration determine chromostereopsis for small pupils. Vision Research, 31, 1787-1796.

Ye, M., Bradley, A., Thibos, L., & Zhang, X. 1992 The effect of pupil size on chromostereopsis and chromatic diplopia: Interaction between the Stiles-Crawford effect and chromatic aberration. Vision Research, 32, 2121-2128.

Youn, G., Lambert, A. M., & Pollack, R. H. 1987 The life-span

trend in the magnitude of the Mueller-Lyer illusion as a function of hue and age. Experimental Aging Research, 13, 53-56.

Zajac, J. L. 1953 Investigations on depth perception in indirect vision. British Journal of Psychology, 44, 132-144.