

帝塚山大学大学院心理科学研究科
博士（心理学）学位論文

視知覚機構解明に関する基礎的研究
ー垂直・水平錯視を用いてー

2022年3月

帝塚山大学大学院心理科学研究科心理学専攻
小原 宏基

目次

要約	1
第1章 序論	4
第1節 緒言	4
第2節 研究の目的	8
第3節 研究の意義	9
第1項 心理学領域への貢献：蓄積されたデータおよび理論の整理とこれからの課題の発見	9
第2項 脳科学領域への貢献：脳科学的アプローチに貢献できる経験的データおよび理論の提供	10
第3項 ロボット工学への「人間らしさ」に寄与できる可能性	10
第4節 研究のあゆみと課題	11
第1項 VHI の要因体系	11
第2項 物理的要因	14
第3項 観察者要因	26
第4項 要因別の結果と課題	35
第5節 本論文の構成	38
第2章 接点位置，向きおよび単眼・両眼視が錯視量変化に及ぼす影響	41
第1節 要因と実験仮説	41
第2節 方法	46
第1項 実験参加者	46
第2項 刺激と装置	47
第3項 背景に関わる物理的環境の統制	48
第4項 実験手続き	48
第5項 実験計画	49
第6項 錯視量の定義	50
第7項 分析方法	50
第3節 結果	50
第4節 考察	54

第1項 接点位置の影響.....	54
第2項 向きの影響.....	57
第3項 単眼および両眼視の影響	58
第4項 今後の展開：発生機序解明に向けて	59
第3章 明所視，薄明視および暗所視が錯視量変化に及ぼす影響	60
第1節 VHI と明暗の関連	60
第2節 方法	62
第1項 実験参加者.....	62
第2項 実験環境	62
第3項 実験手続き	65
第4項 錯視量の定義	65
第5項 分析方法	66
第3節 結果	67
第4節 考察	68
第4章 観察者の俯仰瞰が錯視量変化に及ぼす影響	72
第1節 VHI の刺激図形に関わる実験の変遷	72
第2節 方法	74
第1項 実験参加者.....	74
第2項 実験環境	74
第3項 実験手続き	77
第4項 錯視量の定義	77
第5項 分析方法	78
第3節 結果	78
第4節 考察	80
第1項 俯仰瞰角度が錯視に及ぼす影響.....	81
第2項 本実験の限界と今後の展望.....	86
第5章 長さ-距離不変仮説を用いた異方性の検証.....	88
第1節 異方性の傾向	88
第2節 方法	91
第1項 実験参加者.....	91

第2項 刺激と装置.....	91
第3項 見えの長さの測定.....	92
第4項 実験手続き.....	93
第5項 実験計画.....	93
第6項 分析方法.....	94
第3節 結果.....	94
第4節 考察.....	97
第1項 水平線はなぜ垂直線よりも長く知覚されるか.....	97
第2項 水平線が遠いのか，垂直線が近いのか？.....	100
第3項 先行研究と反駁した理由.....	101
第4項 VHI 図形では，なぜ垂直線に過大視が生じるのか.....	102
第6章 総合考察.....	105
第1節 研究の振り返り.....	105
第2節 文献調査から抽出された課題.....	106
第3節 課題の検証と成果.....	106
第4節 成果から視知覚機構を考える.....	110
第1項 異方性は単眼レベルで生じている.....	110
第2項 異方性と奥行処理.....	111
第3項 異方性の発現の新たな解釈の提案.....	114
第4項 異方性の解明に致命的な俯仰瞰要因.....	115
第5節 今後の課題.....	115
第6節 結言.....	117
引用文献.....	118
謝辞.....	132

要約

本論文は、人間の視知覚機構の解明を目的に、幾何学的錯視の一つである垂直-水平錯視 (Vertical-Horizontal Illusion: VHI) の発生要因を先行研究から導出して分類し、その要因と VHI のメカニズム (機序) を実験によって解析した基礎的な研究である。

第 1 章では、感覚や知覚の研究の歴史や分類方法などを述べ、その中で人間の感覚の 80% を占める視覚 (Zimmermann, 1976) の中でも古くから興味を持たれている錯視の概要を述べた。また VHI に関する 1907 年から 2017 年までの先行研究を調査し、VHI の発生機序の解明に役立つことを目的に、VHI の発生に関与する要因を単純化して大きく、提示図形に関する物理的要因と観測者要因に分類、整理した。その結果、物理的要因の刺激要因である接点位置について、多くの研究では、分割錯視と異方性により垂直線分が水平線分より長く見える過大視を支持し、普遍的要因と考えられている。一方、他の物理的要因では実験環境が同一でないなど条件が異なる場合もあり、結果が対立するケースもあった。また、観測者要因については、観察者の見方、視覚以外の感覚系、目の障がいと個人差など要因が多く、しかも研究数が少ない状況もあり、統一的な見解を得ることは難しい。以上のことから、錯視に関する研究では、(1)接点位置、(2)単眼・両眼視、(3)実験室の明暗、(4)観察者の俯仰視角度、(5)大きさ、(6)背景、(7)中心視・周辺視、(8)姿勢、(9)性別の 9 要因に対して、実験統制などをより厳密で組織的に行う必要があり、VHI の発生機序解明に繋がる普遍性を得るためにより精度の高い検討が必要である。

第 2 章では、物理的要因として水平線分と垂直線分の (1)接点位置および(2)図形の向きの二要因を精査するとともに、(3)単眼視と両眼視という観測者要因の影響について検証した。35 名の実験参加者に、パーソナルコンピュータ (PC) 上に提示された基準線 (50 mm) と同等の長さに見えるように調整線を調整させた。各実験参加者に対して、 $7 \times 4 \times 3$ (接点位置 \times 向き \times 観察方法) 条件で 2 試行 (計 168 試行) が実施され、それぞれの条件での主観的等価点 (Point of Subjective Equality: PSE) が測定された。その結果、(1)接点位置では基準線の中点で過大視が最大を示し、中点から端点にかけては逆に過小視が見られ M 字型の変化を示した。したがって V 字型 (Künnapas, 1955a) よりも M 字型 (Marma, Bulatov, & Bulatova, 2015) を支持した。(2)向きについては、基準線が水平でも垂直に関わらず一貫して M 字型を呈した。しかし錯視の強さには異方性が見られ、垂直方向の方が水平方向より一貫して錯視が強く表れた (Künnapas, 1955a)。(3)両眼視と単眼視との間には、有

意な差異は認められなかった。結論として、垂直線分と水平線分は接点位置だけでなく、向きにも影響を受けた。

第 3 章では、明暗が VHI の錯視の現れ方に及ぼす影響について段階的に明るさを変えることで検証した。先行研究では、暗所視の方が明所視よりも錯視の強さが減弱するという報告 (Künnapas, 1957b) と照度には影響を受けないとする報告 (Avery & Day, 1969) があり、明確でなかった。さらに、接点位置による錯視量変化が明暗により M 字型になるのか V 字型になるのかも検証した。28 名の実験参加者が、PC 上に提示された底線 (50 mm) 上の 5 点のいずれかから垂直に伸びる帆線の長さを、底線と同等の長さに見えるように調整させた。実験参加者の眼前の照度を統制し、 7×5 (照度 \times 接点位置) 条件で各条件について 6 試行 (計 210 試行) が実施され PSE が測定された。結果、明暗は VHI の錯視量に有意に影響し、暗所視 (< 1.0 lx) の方が薄明視 (10 lx) や明所視 (20 lx) よりも有意に減弱し、暗所視の方が減弱するという Künnapas (1957b) の主張を支持した。興味深いことに、順応時間が短かった (8 ~ 12 min.) 暗所視条件での本研究結果に比べて、十分だった (45 ~ 60 min.) 先行研究結果の方が錯視はさらに減弱していた。一方、接点位置への現れ方への影響については、明暗の程度に関わらず一貫して M 字型の錯視量変化が表れた。このことは Künnapas (1955a) が得られた V 字型の結果は明暗によるものではないことが確認できただけでなく、M 字型変化は暗所視だけでなく、薄明視や明所視にも当てはまることが明らかになった。

第 4 章では、VHI の錯視の現れ方や強さへの俯瞰角度および接点位置の影響を検証した。逆 T 字や L 字を含む (5 水準) VHI 図形が、フラットな PC 画面上に提示され、水平線を回転軸として、観察者の矢状面に 15° ごとに遠位 5 水準 ($+15^\circ \sim +75^\circ$)、近位 4 水準 ($-15^\circ \sim -60^\circ$) に傾斜させた。23 名の実験参加者は、垂直線の開始点を含む水平線が提示された後、コントローラで水平線と同じ長さになるように垂直線分を調整するように求められた。各条件での VHI の PSE が測定された。結果は、有意な接点位置の影響が見られ、傾斜の方向に関係なく中点では最大で、中点と端点との間は小さくなり、端点では中点ほどではないが再び増加する M 字型を示した。この結果は先行研究と一致した (Marma et al., 2015; 小原・川合, 2020a, b)。俯瞰角度による錯視量変化も有意で非対称性を示した。すなわち、俯瞰角度が大きくなるほど過小視が生じ、俯瞰角度が大きくなるほど過大視が生じた。非対称性の発生機序について物理光学および生物光学的側面から考察した。

第5章では、VHIの異方性について検証した。VHIは垂直線の方が、物理的に同じ長さの水平線よりも長く知覚される。このような異方性が、二線の相互的な影響を取り除いてもなお生じるか検討するため、一定の長さの線分を、垂直方向あるいは水平方向のいずれか単独に提示し、かつ視距離を変化させた。水平のレール上に乗せられた刺激の線分(50×5 mm)は、その中点が chin-rest で固定された実験参加者の視線と水平に維持されたまま、実験参加者の眼前 40 mm から 4030 mm (8 水準)の間で変化された。22 名の実験参加者は眼前の開閉式スリットを調整して、各距離および各向きに設置された線分の見えの長さが求められた。それぞれの刺激から得られた見えの長さと視距離の関係性(長さ-距離不変関数)が比較された。分散分析からは距離と方向のいずれにも主効果が認められ、交互作用効果は認められなかった。興味深いことに、VHIの一般的現象に反し、同じ距離に提示された同じ長さの線分に対する見えの長さは、垂直線よりも水平線の方がむしろ有意に長く知覚された。この結果は、独立して線分を描いた課題において、有意な VHI を確認した先行研究に反駁した (McBride, Risser, & Slotnick, 1987; Brosvic & Cohen, 1988)。本研究結果は、大きさ-距離不変仮説 (Holway & Boring, 1941)に基づき、二線の見えの長さの違いは、二線に対して知覚される距離の違いによって生じると解釈された。本知見に基づいて、VHI 図形で見られる垂直線の過大視だけでなく、十字図形で異方性が消失する現象を考察した (Charras & Lupeaniz, 2009, 2010)。一方、先行研究結果との対立については、観察者の俯仰瞰要因 (小原・川合, 2021)から考察した。

第6章では、本論文で明らかになった知見を整理し、課題について検証後、視知覚機構について検討し、今後の展望について考察した。

第1章 序論

第1節 緒言

筆者は、大学および大学院において人間型ロボットの運動や行動の制御を学び、その後、数年間、その開発に従事してきた。その過程で、いつも心に引っかかってくる問題は「人間らしさとは何か」であった。物理工学的・数学的な計算理論から、運動や行動の制御や発現は比較的、容易であった。しかし、様々な環境や状況の変化に対応させるために、時々刻々と変化する情報処理を組み込もうとすると、ロボットは速やかには反応はするものの、人間のような最適かつ円滑な対応が途端にできなくなってしまうのである。これが「人間らしさ」というものであり、一遍に失われる瞬間である。このような問題を解決する場合、学習を軸に据え、行動と成果から「人間らしさ」にアプローチするエンジニアが多い（川人, 1992）。しかし、人間らしい行動を発現させるには、物理学の変数や数学の変数ではなく、生物学の変数、すなわち「人間の情報システムで生み出される感覚・知覚情報」を組み込むことが最善ではないだろうか。それゆえ、人間研究で長い歴史とデータの宝庫である心理学分野における感覚・知覚領域へ踏み込むことにした。

心理学において情報処理は「感覚」や「知覚」として表現されてきた。感覚とは内部および外界情報を脳が理解できる言語に翻訳する過程ととらえることができる。五感および身体感覚（Table 1; p.5; 松田, 1995）に分類され、いずれの感覚も生命や生活に重要な役割を果たしている。一方、知覚は、脳言語化された外界情報を、表象化された過去の経験や概念と照合し意味づけする過程である。これら処理過程の構造や仕組みが機構であり、筆者が注目している事項である。感覚機構についてはかなり解明されているが、知覚機構についてはブラックボックスの部分がほとんどである。これらすべての感覚・知覚処理を理解することが理想的ではあるが、そのためにはあまりにも膨大な歳月を要する。そのため、本研究では視覚に焦点を絞ることで知覚機構の視覚部分、すなわち視知覚機構に注目した。ここでいう視知覚機構とは、視覚から取得できる外界情報と人間が蓄積した知見などの内界情報を照合する仕組みを指す。

視覚を選択した理由は、第一に、視覚は外界の情報処理の 80%をカバーしている（Zimmermann, 1976）からであり、第二に、視覚運動系の制御に資するとなると空間知覚が重要となるからである。特に三→二→三次元問題（石井, 2006）、すなわち三次元に存在

Table 1 感覚系の分類 (松田, 1995)

モダリティ	感覚器官 部位	末梢神経部位(受 容器)	主たる中枢部位 (投射領)	通常の適 刺激	感覚の性質
視覚	眼	網膜第1層の視細胞(桿体と錐体)	後頭葉の視覚領野	光 (可視光)	明暗(白黒)や、 赤、黄、緑、青などの色
聴覚	耳	内耳蝸牛基底膜上のコルチ器の有毛細胞	側頭葉の聴覚領野	空気の疎密波 (音波)	調音(純音, 周期的複合音)や雑音などの音
皮膚感覚 (表面感覚)	皮膚	パチニ小体, マイスナー小体, ルフィニ終末, メルケル細胞, 自由神経終末など	頭頂葉中心後回の体性感覚領野	機械的刺激, 温度刺激, 侵害性刺激など	触・圧, 癢, 温・熱, 冷, 痛, 痒など
嗅覚	鼻腔の嗅粘膜	嗅上皮の嗅受容器細胞	嗅皮質(嗅脳)	揮発性の物質	薬味, 花, 果実, 樹脂, 腐敗などの匂い
味覚	舌, 一部の口腔内部位	乳頭の味蕾の味受容器細胞	頭頂葉中心後回の体性感覚領野	溶解性の物質	甘, 鹹(塩味), 酸, 苦などの味
深部感覚 (固有感覚)	骨格筋, 腱, 関節	伸張受容器(筋紡錘, 腱紡錘), 腱受容器, 関節受容器などの固有受容器	頭頂葉中心後回の体性感覚領野	筋・腱・関節に加わる機械的刺激など	四肢の位置や運動の方向・速度, 力(抵抗・重さ), 圧, 痛など
内臓感覚 (有機感覚)	胃, 腸, 心臓などの内臓	内臓器官に分布する自由神経終末, 圧受容器, 伸張受容器, 化学受容器など	頭頂葉中心後回の体性感覚領野	圧, 血糖, 水分不足, 血中酸素など	空腹, 渇き, 排便・排尿感, 心拍動, 息詰まり感, 痛など
前庭機能 (平衡感覚)	内耳迷路の前提器官	耳石器および半規管の有毛細胞	? (または多部位)	重力, 身体や頭部の直進および回転加速	ない(結果としては, 身体の傾きや移動, めまいや乗り物酔いなど)

する情報を、二次元網膜像に映し出し、それを脳は、どのように三次元として再構築するのかというテーマは極めて興味深い。第三に、Wundt や Fechner の時代からの膨大な人間のデータが蓄積されているため、視覚にまつわる普遍的特性や個人差要因に関する知見が豊富だからである。最後に、視覚の研究は、仮想現実 (VR)やパーソナルコンピュータ (PC)を駆使した物理工学、ロボット工学、マン・マシンインタフェース工学の領域や fMRI や NIRS を駆使した脳科学の領域でもめざましい勢いで進展しているため、レディ

ネスやポテンシャルの側面が整っているからである。

このように「人間らしさ」と「視覚」をキーワードにして、研究を組み立てるわけであるが、物理・数理の世界を経験してきた筆者に、次に浮かんだキーワードが「錯視 (visual illusion)」であった。錯視とは、「実在する対象の真の性質とは異なる知覚」(北岡, 2010), あるいは「物理的には同じであっても、人間には間違っていて知覚され、それが同じであると知らされても、なおも異なって知覚される現象」(藤井, 1994; 松田, 1995)と定義されている。

これは心理学では馴染の定義であるが、よく読むと、この定義は、いずれも物理学の世界に人間の世界を当てはめた表現のように考えられる。確かに、我々は物理の世界に生き、生かされている。しかし、人間はそもそも生物学的システムに基づいており、物理の世界と人間の世界は別個であると考えるべきであろう。つまり錯視が起こるのは、人間の情報処理が「間違った」からではなく、独自の処理が「正常に」働いていた結果に他ならないと考えるべきではないだろうか (cf. 松田, 1995)。

我々の細胞や感覚受容器での信号処理は非線形であり、歪ゲージのように線形や比例関係をどこまでも保つことはできない。ミリメートルからキロメートルの範囲の長さを、同じ神経細胞で処理しなければならない。また、人間の情報処理の特徴として、同時に受信する信号は、知覚過程において統合され、そこでは物理や化学の世界は存在せず、感覚様式を飛び越えてしまう。さらに、生物学的情報処理で得た情報は、実際の物理世界とのインタラクションによって整合性が図られ、個体独自に最適化していく (cf. 松田, 1995)。

このように人間は独自の情報処理機構をもちながら、物理世界を難なく生き抜いていけるのは、脳が物理世界をほぼ正確に解釈するだけでなく、折り合いをつけるからであり、人間側の努力の賜物であるように考えられる (cf. 松田, 1995)。そのことから、錯視は人間独自の情報処理系で生み出される感覚・知覚情報の1つと考えられる。それゆえ、錯視が生み出す生物学的変数を見出すことで、その背後の発生機序の解明につながり、結果として筆者が求める人間らしさへの理解につながるのではないだろうか。

錯視については、これまで多種多様の錯視図形や錯視効果が報告されているが、注目する三→二→三次元問題 (石井, 2006)の手がかりを含むのは幾何学的錯視 (geometrical visual illusion)と呼ばれる範疇にあるものである。幾何学的錯視とは、平面上の線分や単純な図形で構成されるもので、「図形の長さ、距離、面積、方向、角度、曲線などの幾何学的関係が客観的な計測結果とずれて知覚される」(松田, 1995)と定義されている。

よく知られているものには、(a)Wundt-Fick (Fick, 1851; Oppel, 1855; Titchener, 1901), (b)Oppel-Kundt (Oppel, 1855; Kundt, 1863), (c)Zöllner (Zöllner, 1860), (d)Hering (Hering, 1861), (e)Delboeuf (Delboeuf, 1865), (f)Jastrow (Jastrow, 1891), (g)Poggendorff (Burmester, 1896), (h)Müller-Lyer (Müller-Lyer, 1899), (i)Ebbinghaus (Titchener, 1901; Ebbinghaus, 1902; 今井, 1984), (j)Ponzo (Ponzo, 1912)などがある (Figure 1)。1890 年頃に世界的に錯視研究が始まったとされ (Boring, 1942), 我が国にも, 元良 (1890)により, ポッゲンドルフ錯視やツェルナー錯視などが幻影として紹介されている。我が国での組織的な研究は, 城戸 (1927)のミュラーリアー錯視の矢羽の角度に関する研究とされている (大山, 2005)。

そこで本研究では, 垂直-水平錯視 (Vertical-Horizontal Illusion: VHI)を用いた実験を行うことにした。VHI は Figure 1-a からも分かるように, 二線が垂直と平行に直交することを基本としており, 幾何学的錯視では最も長い歴史をもち, 最も単純な図形である。しかしながら, 文献調査からもわかるように, 150 年の歳月をかけ, 莫大な研究が蓄積されてきているが, その発生機序については, 依然として諸説紛々としている (Table 2; p.8)。

それゆえ, VHI に関する先行研究を広く遡り, その中から今も活用できる新鮮な知見や VHI の本質に迫る課題を見出し, 次に, 現代の精度と技術を駆使しながら一連の実験を行い, 課題を解決することにした。その結果, 少しでも VHI の発生機序およびその背後にある人間の視知覚機構に近づくことを目標とする。本研究成果から PC 上で視知覚機構を表現でき, そこから人間理解, 特に心理学の感覚・知覚領域に還元でき, また応用として人間と同等の感覚を持ったロボットの開発に貢献できることを期待する。

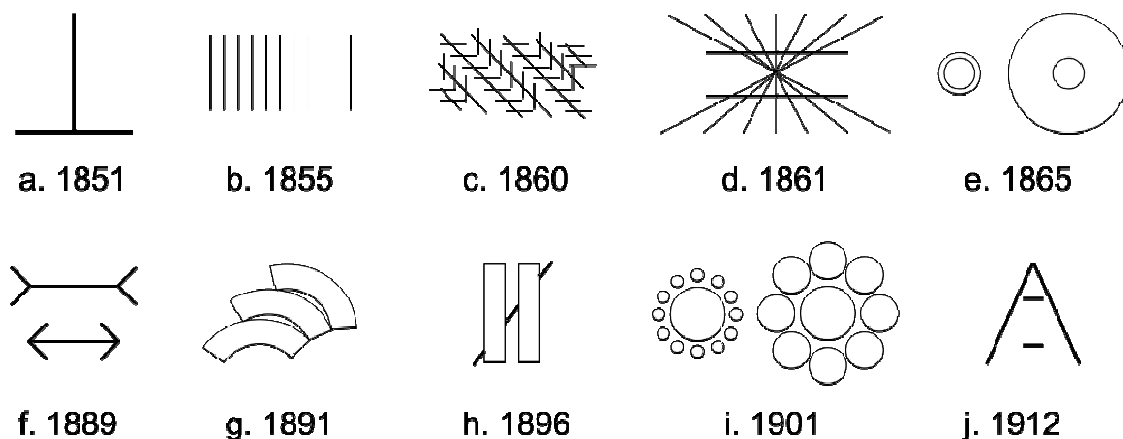


Figure 1 幾何学的錯視図形

Table 2 理論名と研究者の関係

理論及び要因名	研究者名
眼球説	Wundt; Luckiesh
異方性理論 (非対称性の影響)	Obnai; Künnapas; Finger & Spelt; Sleight & Austin; Gardner & Long; Piaget, Matalon & Bang; Pearce & Matin; Restle & Merryman; Prinzmetal & Gettleman; Hamburger & Hansen; Mamassian & de Montalembert; Mikellidou & Thompson
分割説	Oppel; Obnai; Künnapas; Finger & Spelt; Sleight & Austin; Suto; Fraisse & Vautrey; 滝野; 大野; Gardner & Long; Piaget, Matalon & Bang; Girgus & Coren; Wolfe et al.; Charras & Lupiáñez
枠組(視野)の影響	Künnapas; Suto; 大野
眼球運動理論	Wundt; Hicks & River
明るさ効果	Ritter; Künnapas; Avery & Day; 江草・御領; Hamburger & Hansen
練習効果	Vette; 村井・石井
態度の影響	大野
大きさ恒常性の誤作動説	Gregory
3方向不一致説 (網膜子午線の影響)	Avery & Day; 東山
線遠近法説 (斜線の奥行処理の影響)	Woodworth; Wolfe, Maloney, & TAM

第2節 研究の目的

本研究は、人間の視知覚機構の解明のため、幾何学的錯視の一つである VHI に焦点をあて、VHI の発生に関わる要因を先行研究から導出して分類し、その要因がどのように VHI へ寄与しているかといったメカニズム (機序) を実験によって解明することを目的とした。

そのため、VHI に関連する文献を微視的であり、かつ巨視的な視点から概観し、その中から発生に関与する重要な要因および有用な知見を導出した。《第一研究》から《第四研究》では、抽出された課題について、心理学の基礎的実験法に基づいて実験を行い、得られた錯視量の動態から分析を行った。最後に、得られた結果に基づき、VHI の発生機序およびその背後にある人間の視知覚機構について提案して評価した。

第3節 研究の意義

第1項 心理学領域への貢献：蓄積されたデータおよび理論の整理とこれからの課題の発見

VHIに関わる文献調査は、より精度の高い実験を構築するのに貢献するだけでなく、同じ領域で活躍された多くの先達たちおよび彼らが残してくれた人間のデータに対して、感謝と敬意を表するという意味で意義がある。すなわち VHI に関しては、実験心理学や精神物理学の開学当初から現在に至るまで、心理学の実験的手法を用いてさまざまな要因が操作され、実験が行われ、その結果に基づいて発生機序に関する提案がなされてきた。しかし、後述するように、VHI に影響を及ぼす要因はあまりに多く、ほとんどすべての実験において、排除しきれなかった要因が、その発生機序解明を遅らせてきたのではないかと考えられる。

その背景には、開学当初の実験統制、方法、技術、統計処理が、現在に比べて恵まれていなかったこと、あるいは情報網や情報発信の発達していなかった当時では、理論を戦わせたり情報交換が十分にできなかったりしたことも大きいと考えられる。さらに先行研究からは、個人差要因が、発生機序に関わる要因よりも影響が強く、それによって発生機序に辿り着けないのではないかという印象さえうかがわせる。個人差要因が強いということは、VHI を含め外界の視覚情報処理は、個人の生育環境による学習・経験に大きく依存していることを示唆しているのかもしれない。

筆者らが注目するのは、発生機序に直接貢献している要因を見つけ、その背後にある視知覚機構にアプローチすることである。それゆえ、VHI に関する知見を、初期の時代まで遡り、可能な限り収集し、VHI の発生そのものに貢献している要因、すなわち視知覚機構に関与する要因と、個人差要因を整然と整理し可視化する。このような、本研究で実施する文献調査は、VHI や周辺の錯視の発生機序の解明に貢献するだけでなく、これから行う実験に対して、より精度の高い研究を構築するのに貢献すると考えられる。同時に、前述したように、その時代に活躍した多くの先達たちと彼らが残してくれたデータに対して、感謝と敬意を表するという意味で意義があると考えられる。

第2項 脳科学領域への貢献：脳科学的アプローチに貢献できる経験的データ および理論の提供

本研究は、認知心理学のスタンスから、錯視から視知覚機構を俯瞰することを究極の目標としている。そのため、人間で得られたデータから、脳科学の知見と照らし合わせて脳内機構を推測し、それを脳からアプローチする研究者にフィードバックすることを目指している。

視知覚に関する脳内情報処理機構については、感覚レベルまでは確固としたコンセンサスが得られている。しかし知覚レベルとなると未開拓な部分が多いといって過言ではない。つまり、末梢から中枢にかけて行われる視覚情報処理のどの過程において、またどのタイミング、どのような処理によって、錯視が生じているのかはいまだに明らかにされていないのが現状である。特に、本研究が VHI を手がかりに、解明しようとしている「三→二→三次元問題」（石井, 2006）といった空間座標系の処理は、その最たるものである。

筆者の所属する知覚・行動実験室では、既に Haptic perception (アクティブタッチ)における錯覚現象 (Size-weight illusion)から、人間の重さ知覚に関する情報処理機構を脳科学者に提案してきた実績があり (Kawai, 2002a, 2002b, 2003a, 2003b; Kawai, Henigman, MacKenzie, Kuang, & Faust, 2007), これまでに蓄積してきた経験や失敗、解明までのアルゴリズムを本研究にも活用し、人間の視空間処理機構に関する有用な知見を、脳から視知覚機構解明を目指す研究者に提供できると考えている。

第3項 ロボット工学への「人間らしさ」に寄与できる可能性

緒言では筆者の考える「人間らしいロボット」について“人間と同等の感覚を持ったロボット”と述べた。これは筆者が、これまで人間型ロボットの運動や行動の制御を学び、その開発にも取り組んできた過程で、いつも浮かび上がっていた問題であった「人間らしさとは何か」に繋がるものである。物理工学的・数学的な計算理論から、運動や行動の制御や発現は比較的、容易だが、結果的には、人間である我々がインタラクトすると、ロボットの動きには違和感を覚えてしまう。それゆえ、人間が違和感を生じないロボットの創造には、物理学の変数や数理学の変数ではなく、生物学の変数、すなわち「人間の情報システムで生み出される感覚・知覚情報」を組み込むことが最善であると思う。それゆえ、本

研究では、得られた結果を基に、人間を起点に据えた視覚情報処理モデルを構築、さらに PC 上に再現することで可視化することにした。そこでは、当然のことながら人間と同じように「錯視が生じる」のである。このようなアイデアはロボット工学や人工知能の研究者にも有益であると信じている。

第4節 研究のあゆみと課題

第1項 VHI の要因体系

VHI (Figure 2)とは、物理的に同じ長さの垂直線分と水平線分を逆 T 字型「⊥」あるいは L 字型「└」にして観察した際に、水平線分比べて垂直線分が長く見える現象のことをいう (Fick, 1851; Oppel, 1855; Künnapas, 1955a, b; Robinson, 1998; 大山, 2005; 北岡, 2005, 2010)。この錯視は Fick (1851)により初めて報告されたことから「Fick illusion」とも呼ばれ (北岡, 2010; Hilano & Yanaka, 2011; Kinoshita, Tang, & Ishii, 2012; Chouinard, Unwin, Landry, & Sperandio, 2016; Murakami, Mizuno, Yamanaka, Huo, & Murakami, 2019), 以後, Oppel (1855)を始め多くの研究者によって 150 年以上もこの錯視の現象や発生機序の解明に関する研究がなされてきた。

これまでの VHI の研究を調査すると、さまざまな実験環境下で、しかも、さまざまな観察者に対して VHI の発生の有無あるいはその錯視の大きさが報告されている。これらの結果から、VHI の発生にはいろいろな要因が複雑に絡み合っていることが示唆され、VHI の発生要因を明らかにするためには、各種実験環境の違いやどのような観察者なのかを整

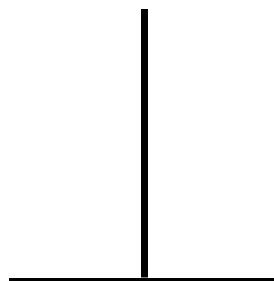


Figure 2 垂直-水平錯視 (VHI)の基本図形

VHI とは、物理的に同じ長さの垂直線分と水平線分を観察した際に、水平線分比べて垂直線分が長く見える現象のことである。

理分析し、それぞれの条件に対する VHI の発生要因を究明する必要がある。

調査した文献においても、VHI の文献を整理分析した研究は存在する（大野, 1959, 1961; 今井, 1960; 平井, 1972; Robinson, 1998）。例えば、大野（1959）は先行研究を現象的要因（11 件）と生理的要因（18 件）の観点から整理した。すなわち、現象的要因とは刺激のもつ物理特性の影響を指し、錯視図形の形状や向き、提示位置および背景の枠組などであり、生理的要因とは観察者側の行動特性の影響を指し、眼球運動や単眼視・両眼視、提示時間（網膜への提示時間の調整）、中心視・周辺視、視野、姿勢などの要因や練習効果などである。彼はこれらの知見について概説しただけでなく、図形の向き（Künnapas, 1955a）、視野の影響（Künnapas, 1955b）については実験を行い Künnapas の結果を追認するとともに、垂直線分の過大視は垂直方向であり、分割錯視は方向に無関係であることを示した。さらに、方向の変化（重力方向、視覚的枠組み方向や観察者の身体方向）の実験では、錯視量が方向の影響を受けることを示した。また、年齢的発達（Winch, 1907; Würsten, 1947; Fraisse & Vautrey, 1956; 生澤, 1958）や練習効果（Valentine, 1912b）については錯視の現れ方に相異があるので、再検の必要性を訴えた。今井（1960）も、大野（1959）の分類に従って 1950 年以降の知見（15 件）を提示時間、図形の向き、凝視、背景の枠組、部屋の明るさごとに紹介した。平井（1972）も発達の側面から、1905 年から 1968 年の知見（7 件）をまとめ、VHI の錯視量の最大値が年少期にピークを迎えるという報告（Winch, 1907; Walters, 1942; Würsten, 1947; Fraisse & Vautrey, 1956）と成人期に迎えるという報告（Hanley & Zerbolio, 1965; 村瀬, 1968）があることを紹介した。Robinson（1998）は、1800 年代（1 件）から 1900 年代（17 件）の知見を年代別に整理してその内容を紹介している。

一方、錯視量の測定方法を整理分析した研究（大野, 1961）がある。大野（1961）は実験の妥当性や再現性の観点から 6 種類の図形（①⊥・②┐・③└・④┌・⑤┒・⑥┑）を用いて、4 つの測定方法（一方の線分を標準刺激として他方の線分を比較刺激とする恒常法、図形外比較法、移調法、マグニチュード推定法）を評価し、刺激図形の刺激パターンを崩さずに刺激間の比率を測定できることから移調法、次にマグニチュード推定法を推奨した。

以上のように VHI の現象に関する文献を整理分析した研究を紹介してきた。しかし、近年でも錯視の研究は活発に行われており、近年の研究を含め、これまでの研究で得られた VHI の現象を改めて整理分類し、普遍的な現象を見出すことができれば、錯視の発生と関連する要因が明確になり、発生要因を解明できる糸口となることが考えられる。

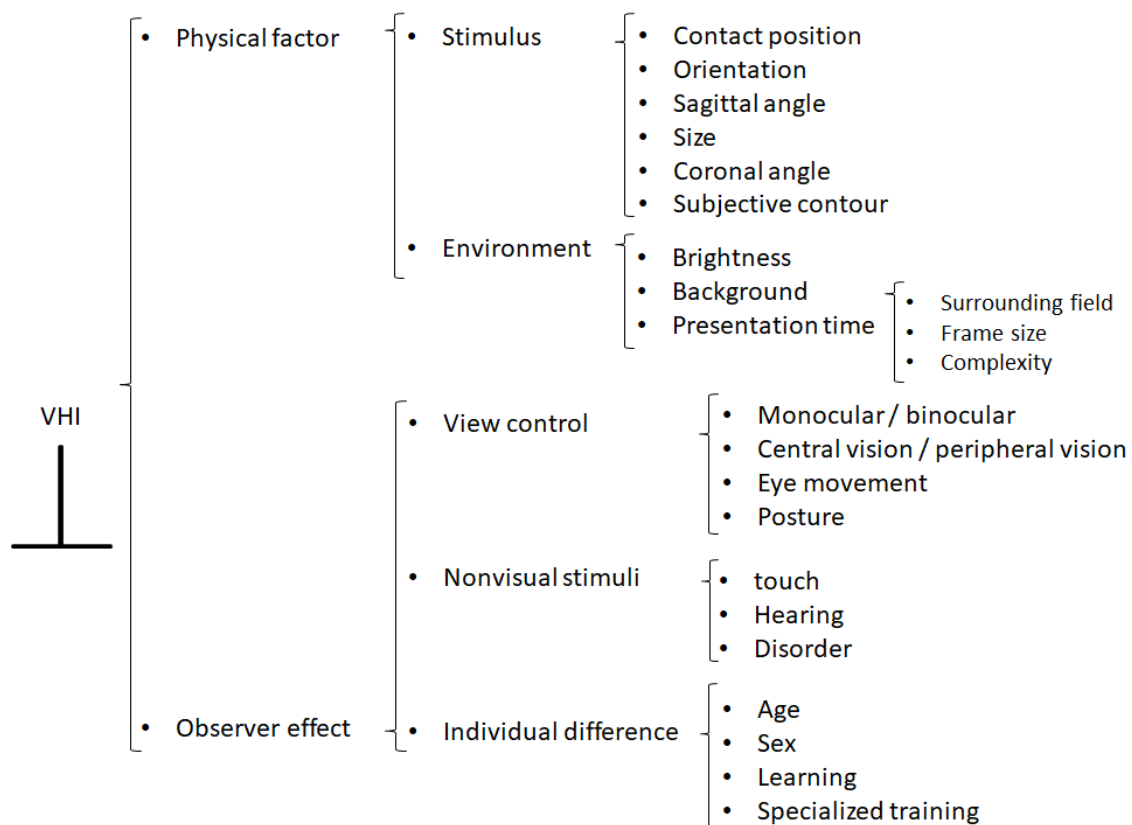


Figure 3 VHI に影響を与える要因

本研究では、先行研究を物理的要因と観察者要因の 2 つの要因に分類した (cf. 大野, 1959)。物理的要因の研究とは、刺激図形、提示環境など、与える刺激の変化や刺激の与え方の操作によって錯視現象を捉えた研究である。具体的には、垂直線分と水平線分の接点や錯視図形そのものの向きを変えたりする実験系である。一方、観察者要因の研究とは、刺激を提示された観察者側に錯視の要因を求める研究で、この要因についてはさらに 3 つに分類した。1 つ目は観察者自身の見方、すなわち“単眼視と両眼視”，“中心視と周辺視”，“姿勢”などの影響について調べた実験系を取り上げた。2 つ目は、視覚以外の感覚系として，“触覚”，“聴覚”，“障がい”に注目した実験系を取り上げた。3 つ目は個人差であり，“年齢”，“性差”，“学習”，“学術経験”を取り上げた。

このことから、本研究では、まずは VHI に及ぼす要因ごとに知見を整理および精査することとした。VHI の発生要因の分類は大野 (1959) がすでに示している分類を参考に、VHI に及ぼす要因を大きく VHI の提示方法の影響により起こる錯視現象 (以下、物理的要因) と観察者自身が由来で起こる錯視現象 (以下、観察者要因) とに分類する。さらに物理的要

因は、刺激そのものの要因と刺激を取り囲む環境の要因の 2 種類に分類し、観察者要因は観察者の見方、視覚以外の感覚系と個人差の 3 種類に分類した (Figure 3; p.13)。

次に各要因について先行研究を比較し、普遍性の高い知見を見出すとともに、さらなる検証が必要な知見について考察した。

なお図形の取り扱いについては、Figure 2 (p.11)に示す逆 T 字型 (⊥)を基本図形とし、└を L 字型、┘を逆 L 字型とした。また垂直線と水平線の接点が離れている場合を離脱型とし、例えば L 字 (離脱)型のように表記した。また錯視の取り扱いについては、以下のよう
に定義した。水平線分 (100%)に対する垂直線分の主観的等価点 (Point of Subjective Equality: PSE)が 100%であれば、錯視は生じておらず、 $PSE < 100\%$ では過大視 (水平線より短く知覚されている)、 $PSE > 100\%$ では過小視 (水平線より長く知覚されている)とした。

次に、図形の回転を伴う場合は、垂直と水平の位置関係が入れ替わることになる。例えば、刺激図形を 90° の回転では水平線が垂直位になり、垂直線が水平位になる。この混乱を避けるために、基本図形 (Figure 2; p.11)の水平線を底線 (Baseline)と呼び、垂直線を帆線 (Mast line)と呼ぶことにした。これに従えば、底線に対して帆線が上側のもの (⊥)を上向き条件 (回転無)、帆線が下側のもの (⌊)を下向き条件 (回転 180°)、帆線が右側のもの (┐)を右向き条件 (回転 90°)、帆線が左側のもの (┌)を左向き条件 (回転 270°)となる。なお、L 字型 (└)や逆 L 字型 (┘)でも同様の取り扱いをすることにした。

第 2 項 物理的要因

刺激図形

接点位置の影響 基本図形 (逆 T 字型)における水平線分 (底線)に対する垂直線分 (帆線)の接点位置の違いが錯視に及ぼす影響について概観する。Figure 2 (p.11)の基本図形は底線の中央で帆線が接しており、この接点を端まで移動させたときの錯視の影響である。

中点で接する時の錯視に関する多くの研究は、垂直線分の過大視錯視 (垂直線分が水平線分を分割する影響と垂直と水平の異方性の影響)を支持し、しかも図形の一方を標準刺激、他方を比較刺激とする接触図形での比較による錯視量を測定する恒常法である。その時の錯視量は、PSE が 75.0 ~ 97.2%の範囲で報告されている (Finger & Spelt, 1947;

Künnapas, 1955a; 大野, 1959; Suto, 1960; Cormack & Cormack, 1974; Carven, 1993; Wolfe, Maloney, & Tam, 2005; Hamburger & Hansen, 2010; Marma, Bulatov, & Bulatova, 2015)。しかし、結果が異なる研究として Mikellidou & Thompson (2013)は、底線よりも帆線を長く知覚 (過小視)したと報告し、Vishton et al. (1999)は、VHI がほとんど起こらなかったと報告している。しかし、前者は四種類の図形 (水平T字 (⊥)とL字, 逆T字 (⊥), 十字 (+))を標準刺激として、その図形の上側または横側に垂直線分あるいは水平線分のどちらかを比較調整刺激として配置する、いわゆる図形外比較法 (大野, 1961)により異方性、隣接と交差についての実験した結果であり、後者は基本図形 (逆T字)を観察者の前面約 50 cm のテーブル上で提示 (サイズと奥行が存在)し、やはり従来とは異なる実験方法、たとえば垂直線分と水平線分それぞれの線長の異なる刺激線分で、基本図形の垂直線分と水平線分の長さを推定させる実験である。いずれも、VHI とは異なる結果を示しているが、これら 2 つの研究は VHI が起こる従来の実験方法とは異なる点に注意して評価する必要がある。

結論から述べると、この 2 つの研究を除いた他の多数の研究は前並行平面で線分同士を比較する測定方法においては底線よりも帆線を短く知覚 (過大視)し、中点においては平均で 90.2%程度の錯視が起こることが指摘されている。

一方、端点で接する図形の錯視は異方性の影響のみと考えられるので、中点で接する場合の錯視量より小さくなることが予想される。報告されている左右端点の研究結果の錯視量は、L字型 (左端点)では PSE の平均 97.2%で 85.0 ~ 115.0%の範囲で (Ritter, 1917; Künnapas, 1955a, 1957b; Suto, 1960; Morinaga, Noguchi, & Ohishi, 1962; Avery & Day, 1969; Cormack & Cormack, 1974; Schiffman & Thompson, 1975; Wolfe et al., 2005; Marma et al., 2015; Mikellidou & Thompson, 2013), 逆L字型 (右端点)では PSE の平均 97.0%で 93.8 ~ 103.4%の範囲で (Ritter, 1917; Künnapas, 1955a, 1957b; Suto, 1960; Schiffman & Thompson, 1975; Marma et al., 2015) 中点で接する場合より減弱し、予想を裏付けている。

さらに Künnapas (1955a)は端点と中点との間にも接点を置いて錯視量を測定した。その結果、中点の過大視が最大で端点へ近づくほど減弱する V字型 (Figure 4-A; p.16)に錯視量が変わると主張した。Wolfe et al. (2005)は PC 環境で同様の実験を行い、Figure 4-B (p.16)のように Künnapas (1955a)よりフラットなイチョウ型の変化曲線を報告した。一方、Marma et al. (2015)の PC 環境を用いた実験では、中点と端点の間では錯視量が小さく

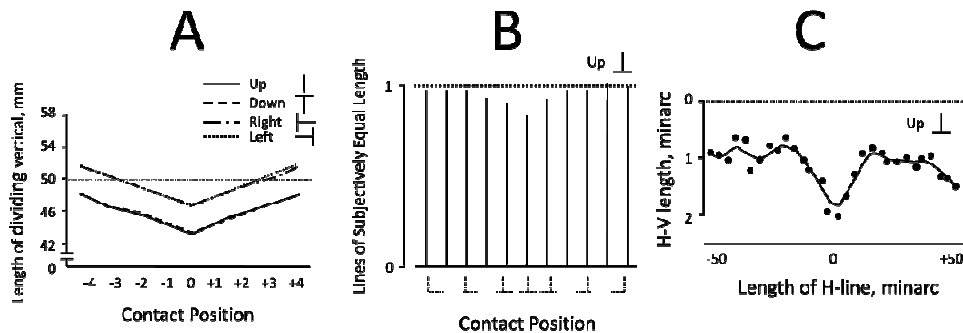


Figure 4 接点位置の実験結果

各研究者 (A : Künnapas (1955a), B : Wolfe et al. (2005), C : Marma et al. (2015))による接点位置における VHI の変化プロフィールである。日本基礎心理学会より使用許可を得て小原・川合 (2020a)から抜粋した。

(PSE = 100%以上)なり，M 字型 (Figure 4-C)を呈すると主張し，小原・川合 (2020a)は同様の実験により M 字型になることを追認した。なお，Suto (1960)の実験では，右半分は V 字型，左半分は M 字型の非対称性を報告している。

以上についてまとめると，中点では 10%程度の錯視が起こり，端点では 3%程度の錯視にとどまることが一般的な特性であると考えられる。しかしながら，中点と端点との間で生じる錯視量の変化の形状については，V 字型 (Künnapas, 1955a)か，イチヨウ型 (Wolfe et al., 2005)か，あるいは M 字型 (Marma et al, 2015)のいずれかが一般的なのか，現時点で結論することはできなかった。注意すべき点は，Künnapas (1955a)以外の研究者は PC を活用しているので，提示精度や PC 画面枠などとの関係性を今後検討することが必要である。

また VHI の発生機序を考える上で考慮すべきことは，眼と脳での画像情報処理，すなわち眼前の図形が水晶体を通して網膜上に映し出された後に電気信号に変換されて脳に送られ図形を認識する情報処理過程のどこかで VHI が発生していることである。この情報処理について，人間の眼は外界情報を網膜上から得るに辺り，三次元から二次元に情報量を落としており，脳はその二次元情報から三次元情報を得る際に三次元情報を推測するための処理 (三→二→三次元問題 (石井, 2006))を行っていると言及する研究がある。また，これに関連した研究として Howe & Purves (2002)は広角レーザー (水平 333° : 垂直 80°)を用いて外界の自然風景である三次元空間座標を網膜上のように二次元の極座標に変換し，

外界と網膜上の各座標の長さを比較できるようにした。その結果、網膜上には同じ長さで投影される線分であっても、角度により M 字型に変化することを示した。このことが直ちに中点と端点との間で生じる錯視量の変化の形状が M 字型と結論するのは早計であるが、これら画像の情報処理が VHI の発生に関連している可能性を示唆している。

刺激図形の向きの影響 最初に、基本図形 (⊥) を前額面と平行に下向き (⌞), 右向き (┘), あるいは左向き (┐) に回転させ向きを変えたときの錯視への影響についてまとめた。上向きと下向き条件では、帆線が底線を分割し、しかも、帆線である垂直線分を過大視する異方性が重なりあって過大視の錯視量が大きくなり、右向きと左向き条件では、帆線が底線を分割することによる水平線である帆線の過大視と、異方性による垂直方向である底線の過大視が相反する錯視として起こり、錯視量が減弱すると考えられる。実際の研究結果でも、基本図形 (⊥) の錯視量の PSE は 90.2% 程度 (接点位置の影響の項目参照) と比較して、下向き条件では同様に PSE の平均が 85.2% で 83.4 ~ 87.1% (Künnapas, 1955a; 大野, 1959) の強い錯視が見られた。また、左右に関しては、右向き条件では PSE の平均が 96.1% で 93.8 ~ 99.6% の範囲 (Finger & Spelt, 1947; Künnapas, 1955a; 大野, 1959; Hamburger & Hansen, 2010), 左向き条件では PSE の平均が 96.8% で 93.9 ~ 99.6% の範囲 (Künnapas, 1955a; Marma et al., 2015) となり、錯視が顕著に減弱することが示されている。

次に、L 字型及び逆 L 字型での錯視への影響についてまとめた。上向きと下向き条件では、帆線である垂直線分が異方性により過大視となり、右向きと左向き条件では、底線となる過大視された垂直線分と同一の長さになるように帆線となる水平線の長さを調整されるために、過小視となる錯視が起こると考えられる。このことは報告されている研究結果が示している。すなわち、L 字型 については、上向きの PSE の平均 97.2% (接点位置の影響の項目参照), 下向き条件では PSE の平均が 97.6% で 96.5 ~ 103.8% の範囲 (Ritter, 1917; Künnapas, 1955a; Begelman & Steinfeld, 1967; Avery & Day, 1969), 右向き条件では PSE の平均が 105.4% で 103.7 ~ 107.6% の範囲 (Ritter, 1917; Finger & Spelt, 1947; Morinaga et al., 1962; Avery & Day, 1969), 左向き条件では PSE の平均が 105.5% で 105.2 ~ 105.7% の範囲 (Ritter, 1917; Künnapas, 1955a) であり、逆 L 字型の上向きの PSE の平均 97.0% (接点位置の影響の項目参照), 下向き条件では PSE の平均が 97.5% で 92.5 ~ 102.5% の範囲 (Ritter, 1917; Schiffman & Thompson, 1975), 右向き条件では PSE の平

均が 104.0%で 98.1 ~ 109.8%の範囲 (Ritter, 1917; Avery, 1970), 左向き条件では PSE の平均が 99.4%で 94.3 ~ 104.5%の範囲 (Ritter, 1917; Begelman & Steinfeld, 1967)であり, L 字および逆 L 字図形とも上下方向は過大視錯視が大きく左右方向は過大視錯視が減弱し, むしろ過小視となっていることがわかる。

また Mamassian & de Montalembert (2010)は向きを上下群と左右群に分け比較し, 前者の錯視量が後者のそれよりも 6.0%増加することを報告した。矢内・尾崎 (2016)は, フリーハンドで描かれた図の結果でも Mamassian & de Montalembert (2010)が示した縦横比率になるのかどうかを検討し成り立つことを示した。

なお, この特性は中点と端点との間の錯視量を調べた研究においても共通しており, 接点への影響は一定のまま, 上向きおよび下向きに比較して, 右向き左向きの錯視量が一貫して減弱した (Künnapas, 1955a; Marma et al., 2015)。

以上から, 水平位にある底線を基準として帆線を比較したときと, 垂直位にある底線を基準として帆線を比較したときとでは, 錯視量のあらわれ方は異なり, 前者の方が顕著に大きくなると言える。

刺激図形の方角性について, 近年, 脳神経科学からの知見も発表されている。Yacoub, Harel, & Ugurbil (2017)は (7-T)高磁場 fMRI を用いて, 水平線 (0°)や垂直線 (90°), そして斜線 (45° ・ 135°)を提示し, 人間の空間認知のときの脳内の様子を検討した。その結果, 一次視覚野などの視覚皮質において垂直線 (90°)を提示すると最も脳内の活動量が多くなることを示した。今後は VHI の解明に関して, このような研究アプローチも必要と考えられる。

矢状方向の角度変化の影響 これまで取り上げてきた研究では, 刺激図形は観察者の視軸に垂直 (90°)となるように提示され, 真横から観察された際の錯視を取り上げてきた。ここでは, 視軸に対して 90° に提示された刺激図形を 0° とした場合, そこから矢状方向に手前側 (+方向)に傾けたり, 奥側 (-方向)に傾けたりした際の影響について研究をまとめた。

von Collani (1985b)は, 逆 L 字型の図形を手前側から 57.3° , 37.4° , 0° に傾け, 錯視量を検討した。その結果, 57.3° では過小視 ($PSE > 100\%$)が, 37.4° と 0° では反対に過大視 ($PSE < 100\%$)が起こり, 0° のときに PSE は 93.4%で過大視が最大となる。このため, 垂直軸を PSE (基準 = 100%)として, 水平軸を角度で + 方向を左, - 方向を右に

した時の錯視量 (PSE)変化は右下がりのプロフィールとなった。また、安岡・石井 (2014) は逆 T 字型と T 字型の図形を 45° から -45° まで傾けて錯視量を検討した。その結果、その範囲では過大視が見られ、 45° , 0° , -45° の条件において逆 T 字型の図形ではそれぞれ 92.8%, 95.4%, 96.2%となり、T 字型の図形ではそれぞれ 94.3%, 92.8%, 92.4% の錯視量が得られた。さらにそれぞれの間では過大視が強くなり、特に、逆 T 字型は -30° (92.0%)の時のほうが、T 字型は 15° (90.8%)の時のほうがより過大視が強くなり、これらの結果を図形化すると、ともに W 型のプロフィールになることを報告した。さらに、小原・川合 (2021)も暗室において底線と帆線の接点位置を L 字型から逆 T 字型を経て逆 L 字型へ 5 等分に変化させた 5 種類の図形を表示させた PC 画面を $+60^{\circ}$ から -75° まで 15° おきに傾けた時の錯視量 (PSE)を測定した。その結果、錯視量 (PSE)変化は von Collani (1985b)と同様に右下がりのプロフィールとなり、角度が+側すなわち仰観した時に過小視で一側すなわち俯観した時は過大視となる傾向を示した。

以上をまとめると、錯視量変化プロフィールは右下がりプロフィール (von Collani, 1985b; 小原・川合, 2021)と W 型プロフィール (安岡・石井, 2014)があり、図形により対立している。これは分割説 (Oppel, 1855; Künnapas, 1955a; Girgus & Coren, 1975; Wolfe et al., 2005; Charras & Lupiáñez, 2009, 2010; Hamburger & Hunsen, 2010; Mammassian & de Montalembert, 2010)が指摘するように逆 T 字型図形と L 字型および逆 L 字型図形で人間自体の反応が異なるためなのか、他に別の原因があるのかをこの 3 つの研究結果のみから判断することは難しい。しかし、小原・川合 (2021)の結果が仰観では過小視で俯観した時は過大視となる傾向を示したことから、矢状方向の影響は観察者の俯仰角の視知覚機構解明の手がかりになると考えられるので、今後もさらなる研究が求められる。

図形の大きさ (長さ)の影響 ここでは観察者の前に提示する刺激図形の大きさを変化させたときの影響について紹介する。大きさ (長さ)に関する研究では、同一尺度 (例えば、同一提示距離による換算など)での比較がより正確に判断できる。しかしながら、研究によっては明確な提示距離の記載がないものもあるため、各々の研究の値をそのまま採用した。

Valentine (1912a)は、L 字型の底線を 40 mm, 60 mm, 100 mm と変化させたときに生じる帆線の錯視量を検討した。その結果、錯視量 (PSE)はそれぞれ 95.8%, 93.6%, 95.0%で過大視となり、しかもほとんど差異が認められなかった。Begelman & Steinfeld (1967)

は、L字型（下向き）および逆L字型（左向き）の底線を 50 mm, 100 mm, 200 mm と変化させたときに生じる帆線の錯視量を検討した。その結果、前者の条件での錯視量（PSE）は、それぞれ 88.9%, 95.7%, 98.2%であり、また後者の条件では、それぞれ 90.0%, 92.9%, 94.7%で、いずれの条件においても、過大視となり大きさに有意な影響が認められた。

以上の結果、大きさ（長さ）の影響については、いずれも過大視であることは共通している。しかし、錯視量の結果については文献も少なく意見が対立しているだけでなく、前者の研究（Valentine, 1912a）では見えの大きさに決定的な影響を与える刺激と観察者との距離について言及されておらず、比較検討することも困難であり先行研究を参考にした再実験（追試）が必要である（Перельман, 1959; 上野, 1968; 大山, 2008）。

底線上の帆線角度の影響 ここでは、底線上の帆線が前額面上に 90° から左右に傾斜したときに生じる錯視について検討した研究をまとめる。なお、研究そのものは、提示図形内に斜線が含まれることから観察者の中に無意識で奥行知覚が発生すると考えられるので、水平線と垂直線が誘発する錯視から逸脱し、むしろ、ミュラーリアー、ヘリング、ツェルナーのように斜線で誘発する錯視とみなすことができる。しかしながら、長年提唱されてきた様々な錯視における奥行説（cf. Gregory, 1963）について近年 VHI においても遠近（Perspective）理論（線遠近法; Wolfe et al., 2005）のように奥行（遠近）との関係から VHI の解明が盛んに議論されているので、ここに紹介する。左右の角度については、帆線が底線に対して垂直位を 0° とし、左側への傾斜を「負」、右側への傾斜を「正」で示した。

まず逆 T 字型図形を用いた研究では、Suto (1960) と Wolfe et al. (2005) は、 0° を底として左右に角度が変化するに伴い、過大視は相対的に小さくなる碗型のプロフィールを示した。しかしながら、Cormack & Cormack (1974) は -30° および 30° のときに過大視が大きく、左右に角度が変化するに伴い、過大視は相対的に小さくなる W 型のプロフィールを示した。

一方、L 字型図形を用いた研究（Morinaga et al., 1962; Cormack & Cormack, 1974; Wolfe et al., 2005）では、いずれの研究においても負の角度が大きいほど底線よりも帆線が短く知覚され、正の角度が大きいほど短く知覚されにくくなることが示された。なお、研究は少ないが、十字型図形を用いた研究（Suto, 1960; Cormack & Cormack, 1974）と逆 T 字型（右向き、左向き）（Cormack & Cormack, 1974）を用いて角度の影響を調べたものは、W 型と同じようなプロフィールとなった。離脱型条件（Shipley, Nann, & Penfield, 1949;

Pollock & Chapanis, 1952; Carven, 1993; Zhu & Ma, 2017)を用いて角度の影響を調べたものは, Shipley et al. (1949)は逆 T 字型図形の碗型と同じようなプロファイルが表れ, それ以外の研究は W 型プロファイルと準ずる結果となった。逆 L 字型図形を用いた研究 (Cormack & Cormack, 1974)は L 字型図形と準ずる結果となった。

以上のように底線上の帆線角度の影響については, 少なくとも角度の有無が錯視量に影響を与えているとはいえるが, その変化は W 型 (Chapanis, 1952; Cormack & Cormack, 1974; Pollock & Carven, 1993; Zhu & Ma, 2017), 碗型 (Suto, 1960; Wolfe et al. 2015) など様々であり, また底線と帆線の位置関係によっても影響のあらわれ方は異なっていた。これについて, Mammassian & de Montalembert (2010)は底線と帆線の分割位置とそれぞれの線分の向きによって錯視量に変化が表れることに言及し, それをモデルとして提唱した (late-noise model)。このことから, 斜線の影響については分割説の影響が大きいと考えられるが, 近年提唱されている奥行説との関係もあるため, 今後の検討が必要であろう。

主観的輪郭の影響 刺激図形の底線に主観的輪郭を用いた際の VHI の錯視の現れ方を検討したものがある。Meyer (1986)は, 主観的輪郭線によって基本図形の底線を浮かび上がらせ, 実際の線分での錯視の現れ方と比較した。その結果, 実線と輪郭による差は見られなかったことを報告した。主観的輪郭線の影響は, この研究だけでは論じることが困難であり, 帆線を主観的輪郭線にした場合や輪郭線の太さの影響など幅広い研究が必要である。

提示環境

明るさの影響 ここでは, 刺激図形を提示する環境のうち, 実験室の明るさの影響を扱った文献をまとめた。明るさの単位は光度 (cd), 光束 (lm), 輝度 (cd/m^2), 照度 (lx)など研究ごとに異なるため照度値に換算した。

最初に明るさに注目したのは Ritter (1917)である。彼は外の光を遮断して照明の数 (8 個 vs. 7 個)を変化させ, 刺激図形 (L 字型および逆 L 字型)の錯視量を測定した。その結果, 差異がないことを報告した。次に Künnapas (1957b)は, 150W の照明で暗所視 (0 ~ 0.01 lx)と明所視 (286 lx)の環境を作り, L 字型図形の錯視量 (PSE)を測定した。その結果, 明所視 (92.9%)の方が暗所視 (95.2%)に比べて底線よりも帆線を有意に過大視することを示

した。一方, Avery & Day (1969)は, 暗所視 (0 ~ 0.01 lx)と薄暗がり (27.3 lx), 明所視 (300 lx)の 3 条件で, L 字型図形の錯視量 (PSE)を測定した。その結果, それぞれ 94.1%, 95.6%, 97.4%となり差がないことを報告し, 暗所視から明所視なるほど過大視が減弱し, Künnapas (1957b)の結果とは対立した。Prinzmetal & Gettleman (1993)は, フィルター付の眼鏡を用いて L 字型図形で暗所視 (0.79 lx)と明所視 (147.34 lx)の 2 条件で錯視量 (PSE)を測定し, 暗所視 (98.3%), 明所視 (96.9%)であることを示し, Künnapas (1957b)の結果と同一の傾向を示した。江草・御領 (1998)は, 薄明視を 13 段階 (3.77 ~ 7.53 lx)に分け, 基本図形 (逆 T 字型)の錯視量を測定したが有意な差異は認められなかったと報告した。また, 小原・川合 (2020b)は暗所視 (< 1.0 lx)と薄暗がり (10 lx), 明所視 (20, 40, 80, 160, 320 lx)の 7 条件で底線と帆線の接点位置を L 字型から逆 T 字型を経て逆 L 字型へ 5 等分に変化させた 5 種類の図形で錯視量 (PSE)を測定した。その結果, 暗所視の過大視が薄明りや明所視よりも減弱し, Künnapas (1957b)の結果と同一の傾向を示した。

なお, 背景と刺激図形の明るさの対比による影響を検討した研究がある。Hamburger & Hansen (2010)は, 全体の輝度は一定 (325 lx 程度)にして背景と刺激図形 (逆 T 字型; 上向き・右向き)の明るさを変え, 2 種類の明度条件 (背景 < 図形, 背景 > 図形)での錯視量を比較した。その結果, 明るさの対比による錯視への影響は認められなかったと報告した。

これらの結果から実験室の明るさの影響については, 暗所視 < 明所視 (Künnapas, 1957b ; Prinzmetal & Gettleman, 1993 ; 小原・川合, 2020b), 暗所視 > 明所視 (Avery & Day, 1969), 暗所視 \simeq 明所視 (Ritter, 1917)となり明所視のほうが暗所視より過大視が強い傾向を支持する研究が多い。

この環境の明るさについて, 人間の虹彩に直接影響すると指摘する研究もある。Hartline (1940)によると, 暗所での観察について順応時間を長くした方がそうでない方よりも光への感度が上がると報告している。さらに実験室の明るさではないが, 背景と刺激図形の明るさの対比による影響を検討した研究がある。

このように明るさの影響については, 実験室の明るさだけでなく, 虹彩や背景と刺激図形そのものの明るさが錯視に与える影響なども 研究する余地が残っているといえる。

背景の影響 錯視図形を取り囲む背景の影響について概観する。背景とは, 図形の後方に広がる「地」全てを含み, 枠 (Frame)や図形が描かれたパネル, さらに実験室や野外の

風景など観察者の視認できる背景をも含んでいる。

枠の形状の影響について、Künnapas (1957a)は L 字型の背景に、矩形形状や楕円形状、正方形形状、円形状を用いて錯視量 (PSE)を比較した。その結果、矩形形状や楕円形状を横長に配置した方 (94.1%)が、縦長に配置した方 (97.6%)や正方形形状や円形状 (95.8%)を配置した場合に比べて、底線よりも帆線が有意に過大視されることを報告した。Houck, Mefferd, & Greenstein (1972)は、Künnapas (1957a)と同じ図形を用いて、その縦横比を変えて L 字型に見られる錯視量を比較した。その結果、形状の縦横比は錯視量に影響しなかったことを報告した。Prinzmetal & Gettleman (1993)は、L 字 (離脱)型を用いて、縦長矩形形状と横長矩形形状を背景に用いたときの錯視量を測定した。その結果、縦長矩形 (96.1%)は横長矩形 (98.5%)よりも有意に過大視されることを報告した。さらに、眼鏡などを用いて観察者自身の視野の形や大きさを変えて、その錯視量を測定した研究も見られる。Künnapas (1959)は眼鏡を用いて観察者の視野を制限して、L 字型の錯視量 (PSE)を測定した。その結果、視野を横長に制限した場合 (94.7%)が、縦長に制限した場合 (97.8%)よりも有意に過大視が大きく、背景枠の結果と一致した (Künnapas, 1957a)。

以上は基準線分が水平線分で調整線分が垂直線分とした L 字型を刺激図形としているが、基準線分を垂直線分、調整線分を水平線分とした逆 T 字型 (右向き)と L 字型 (右向き)の刺激図形の研究 (大野, 1959)がある。枠組みは、円形と縦長矩形、横長矩形に背景を変化させて錯視量 (PSE)を比較した。L 字型 (右向き)では、どの背景条件においても錯視量 (PSE)が 100%より大きく、枠組みによる過小視の錯視量には有意差が認められず、横長矩形 (108.6%)が縦長矩形 (104.7%)より過小視が大きくなる傾向があったと報告した。この結果から、他の研究結果と比較するため、水平線分に対する垂直線分を比に換算すると、横長矩形 (92.1%)が縦長矩形 (95.5%)となり垂直線分の過大視となっていることがわかる。

さらに大野 (1959)は、逆 T 字型 (右向き)でも同様の実験を行い、他の背景に比べ横長矩形 (96.1%)の錯視量が有意に小さくなり、円形 (90.3%)と縦長矩形 (90.2%)間では有意な差がないことを示した。しかし、この結果は上記の提示図形とは異なる逆 T 字型 (右向き)であるため、分割と異方性錯視の両方の影響を受けると考えられるので参考程度にとめておく。

以上から、枠形状の影響については、過大視で横長矩形の錯視量が多い (Künnapas, 1957a, 1959; 大野, 1959)と過大視で縦長矩形の錯視量が多い (Prinzmetal & Gettleman, 1993)、そして変化がない (Houck et al., 1972)に分かれる。

枠の大きさの影響について、Künnapas (1955b)は、一本の帆線（長さ一定）が描かれた正方形の大きさを変化させて、見えの長さを比較した。その結果、背景の正方形が大きくなるほど、線分がより短く知覚されることを報告した。

背景の複雑さの影響には、枠内に複雑な背景を用いてその影響を検討したものと野外の背景や建物など複合的な影響を検討したものがある。

前者について、Mankin (1969)は、背景に宇宙空間のような複数個のドットの影響を調べるために、基本図形（逆 T 字型）を用いて帆線を基準として底線の PSE を求めさせた。その結果、ドットの影響について、過大視であるが錯視量に有意な差がないことを示唆した（ドット無：96.0%，ドット数 50 個：96.3%，ドット数 700 個：97.9%，ドット数 1400 個：97.3%）。

後者については、von Collani (1985a)は、日常見られる奥行手がかりの影響を調べるため、逆 L 字型を提示する際に背景を実際の道路や塀などにして錯視量（PSE）を測定した。結果、これらが無い場合（92.7%）に比べて、ある場合（87.2%）の方が過大視が有意に大きくなった。Chapanis & Mankin (1967)は、野外の風景を背景として、そこに映る建物、電柱、木材に打ち込まれた釘などの垂直方向の長さを視認させ、その PSE を水平方向に記録させた。その結果、単純な図形でなく視覚的に豊かな環境下における対象物であっても、ばらつきはあるが垂直方向の対象物の実際の長さとは水平方向に記録した長さとの間に差が現れることを示した。また、Higashiyama (1992)は、野外における建物の窓枠を使い、測定方法について分度器を使い視角を生み出す角度生成法と視距離を調整することで視角を生み出す距離生成法、そして言葉で伝える口頭推定法と比較を行った。その結果、角度生成法や口頭推定法で得られた結果を計算により予測することができること、月の錯視などにも応用可能であることを示した。さらに、Li & Durgin (2017)は 3D 動画を用いて空と草原を背景に、かつ前後に移動する人間が小さくなったり、大きくなったりする中で L 字型や L 字（離脱）型の錯視量を測定した。その結果、人間が小さく（遠く）なった背景のときに過大視が大きくなることを報告した。

以上から、野外のような複雑な背景においても、VHI が一貫して生じることは確かなようであるが、奥行手がかりの操作について、ドットの個数だけでよいのかについても疑問が残る（Mankin, 1969）。今後のさらなる研究が必要といえよう。

提示時間の影響 提示時間も錯視に影響する要因の 1 つである。

Faisse & Vautrey (1956)は、基本図形 (逆 T 字型)と L 字 (離脱)型を用いて、提示時間を 0.2 s, 1.0 s, 無制限という 3 条件にして錯視量 (PSE)を検討した。その結果、基本図形において、それぞれ 71.0%, 72.9%, 81.2%であった。また L 字 (離脱)型においては、85.7%, 87.1%, 88.3%であり、両刺激条件ともに、提示時間が短い方が過大視が大きくなることを示しているが、有意差の検討はされていない。Piaget, Bang, & Matalon (1958)は、基本図形と L 字型を用いて、提示時間を 0.04 s, 0.1 s, 0.2 s, 0.5 s (L 字型のみ測定), 1.0 s および無制限という条件で錯視量 (PSE)を検討した。その結果、基本図形 (逆 T 字型)において、それぞれ 71.0%, 63.3%, 64.5%, 67.8%, 72.7%であり、同時に L 字型では、それぞれ 94.7%, 94.7%, 94.6%, 94.4%, 95.2%, 95.6%であることを報告したが、各数字に関して有意差の検討はされていない。しかし、錯視量 (PSE)を比較すると両図形とも過大視がすべての提示時間で起こっており、しかも提示時間に関係なく基本図形 (分割錯視と異方性錯視)の方が L 字図形 (異方性錯視)より過大視が大きくなることを示している。

まとめると、錯視量 (PSE)への提示時間の影響については、 $PSE(\text{時間が短い}) < PSE(\text{時間が長い})$ (Faisse & Vautrey, 1956; Piaget et al., 1958)であり、提示時間が短いほうが過大視が大きく、あまりにも提示時間が短い場合 (0.04 s)は逆に過大視が減弱するという報告がなされている (Piaget et al., 1958)。

提示時間と錯視の関係において、対象物を観察する際にサッケードが影響する (三浦・坂戸・河野・小川, 2011),あるいはサッケードが錯視に影響している可能性を指摘している (Wundt, 1897; Titchener, 1901)。特に Wundt は 1858 年にサッケードが錯視の原因であると主張していた (Boring, 1942)。また、金子 (2010)が人間のサッケードは 0.02 s から 0.08 s 程度で眼球が高速に動くことを報告している。これらの知見から、提示時間が短い場合に影響する眼球の動きについて、Piaget et al. (1958)の研究の提示時間が 0.04 s の条件のみの結果が異なっているのは、人間のサッケードの影響が考えられる。

第3項 観察者要因

観察者の見方

単眼視・両眼視の影響 Valentine (1912a)は、単眼視および両眼視における L 字型と逆 L 字型での錯視量を調べ、両眼視に比べ右単眼視の錯視量が大きく、反対に左単眼視のそれが小さくなると報告した。Künnapas (1957c)も同様の図形で実験を行い、L 字型の錯視量 (PSE)は左眼 95.3%・右眼 96.9%で、逆 L 字型のそれは左眼 97.1%・右眼 94.8%となり、図形によって左右差に有意な差異があることを示した。また、同時に左右単眼と両眼視との錯視量 (PSE)を測定して左単眼：96.2%・右単眼：95.8%・両眼：96.0%となり、差がないことを示した。Vette (1964)は、基本図形を 30 名の観察者に暗闇で右単眼と左単眼で観察させた。その結果、右単眼の錯視量の方が左単眼の錯視量よりも有意に大きくなることを示した (右単眼：85.75%；左単眼：93.56%)。

以上をまとめると単眼視の左右差や両眼視での錯視量の影響については、Valentine (1912a)は右単眼視 > 両眼視 > 左単眼視となり結果的に左右差があることを報告し、Künnapas (1957c)は提示図形によって左右差があることを示したが、両眼視との比較においては差がないことを報告し、Vette (1964)は右単眼視 > 左単眼視という結果を示している。しかし、これらの研究は左右差を検討する際に考慮しなければならない利き目・非利き目の調査がなされていない。この点で参考になるのが Prinzmetal & Gettleman (1993)の研究である。彼らは利き目・非利き目の観点から単眼視と両眼視を提示図形が L 字 (離脱)型を使用して調べた。その結果、利き目での錯視量 (98.6%)が両眼視のそれ (97.5%)よりも有意に小さく、一方、非利き目での錯視量 (97.6%)と両眼視のそれ (96.4%)との比較でも同様の結果を示した。しかし残念ながら利き目と非利き目の差異には触れられていない。

このことから左右差に関しては利き目と非利き目の差異を考慮する必要がある。また、単眼視と両眼視の比較については、Julesz (1971)は VHI 図形について単眼視レベルで処理されており、輻輳や立体視などの影響は受けないとした。このことから、検討事項は残っているものの Künnapas (1957c)の考えが有力なのではないだろうか (cf. 小原・川合, 2020a)。

中心視と周辺視の影響 錯視図形が観察者の網膜上のどの位置に結像するかによって錯視量は変化するのかどうか、中心視と周辺視からのアプローチについて概観する。

Pearce & Matin (1969)は、観察者の注視点を固定させて、視野の上下左右方向に配置した L 字型の錯視量を測定した。その結果、中心視野での錯視がもっとも強く、上下方向に配置するほど錯視は減弱した。しかし左右方向では個人差が大きく、上下方向ほど顕著ではなかった。これに類するものとして Piaget et al. (1958)は、基本図形と L 字型を用いて、注視点を帆線上または底線上に固定して錯視量を比較した。その結果、基本図形については底線側に注視点を置いた場合の方が錯視が強くなることを示し、L 字型については帆線側に注視点を置いた場合の方が錯視が強くなることを示した（基本図形：帆線 73.9%；底線 71.5%；L 字型：帆線 94.4%；底線 96.8%）が、記述統計以外の分析は行っていない。

一方、Thompson & Schiffman (1974)は、逆 L 字型を固定された注視点に対して左右方向に移動させた。その結果、錯視量が中心視野よりも周辺視野の方が増加し、Pearce & Matin (1969)とは対立する結果を報告した。また Künnapas (1957c)は、周辺視で観察させたかは言及していないが、鼻側とこめかみ側の錯視量を比較して、鼻側（左眼：逆 L 字型；右眼：L 字型；97.0%）とこめかみ側（左眼：L 字型；右眼：逆 L 字型；95.0%）で有意な差があることを報告した。

このように中心視と周辺視の影響は、上下方向について中心視 > 周辺視 (Piaget et al., 1958; Pearce & Matin, 1969 (基本図形))、左右方向については中心視 > 周辺視 (Pearce & Matin, 1969)と中心視 < 周辺視 (Piaget et al., 1958 (L 字型); Thompson & Schiffman, 1974)と対立している。このことについては、中心視と周辺視の細胞機能の違いから考えると理解しやすい。池田 (1988)によると、中心の方が周辺よりも視神経の密度が高く、特に中心窩では専用回線があると述べている。また福田 (1978)も視機能は周辺部よりも中心部の方が複雑で高次なものになると述べている。これらのことから総合すると、VHI 図形を中心視ができる箇所に提示した方が、周辺視ができる箇所に提示するよりも明確に比較できるのではないかと考えられる。しかし視機能については、小田 (1999)によって中心窩と周辺視野で役割が違うとも述べられているため、まだ結論を出すことは早計であろう。

眼球運動の影響 眼球運動が錯視を生起させているという研究がある。Künnapas (1958b)は L 字型を使い、注視点を交点に固定した条件と自由に動かしてよい条件を比較し、動かしの方 (95.2%)が固定した方 (95.7%)よりも過大視が有意に強くなることを報告した。

Chouinard, Peel, & Landry (2017)は視線追跡を用いて、凝視を安定させることで過大視が強くなることを報告した。

VHI 図形を観察する際に凝視するか否かによって錯視に影響があるのかについては、最新技術を用いた研究 (Chouinard et al., 2017)では凝視させた方が錯視量が大きくなるという結果がある。これは眼の中心の方が周辺のそれよりも視神経の密度が高いと述べている池田 (1988) の知見から考えると、提示図形を見る際に眼を動かすことができれば、より鮮明に提示図形を認識することができる。その上、眼の動きがあることで筋肉の動きの情報も脳に入力されるため、より精査された情報から長さを検討することができると考えられる。このことから、Chouinard et al. (2017)の知見の方が妥当なようにも考えられるが、研究数が少ないためここで結論付けることは早計であり、今後さらなる検討が期待される。

姿勢の影響 重力軸や網膜子午線 (田島, 1960; 東山, 2012)の観点から姿勢と錯視の現れ方や強さを検討した研究について概観する。なお、姿勢に関する表現は、重力方向と頭部上下軸が一致 (平行)する場合を正立位 (正立座位)、直交する場合を側臥位、逆方向の場合を倒立位を用いた。

Ritter (1917)は、逆 L 字型を用いて正立座位、側臥位 (角度の記載はなし)および倒立位の錯視量を検討し、姿勢は錯視量に影響を与えないことを示した。Künnapas (1958a)は、L 字型を用いて、頭部の傾きの影響について検討した。その結果、傾きが 0° (正立位)のときの方 (96.3%)が、 -85° (左側臥位)のとき (103.2%)よりも錯視が強くなった。Morinaga et al. (1962)も、L 字型を用いて頭部の傾きを -90° から 90° に変化させ検討したが、 90° (右側臥位)から過大視が大きくなり 30° のときに錯視はもつとも強くなった (94.0%)。以後過大視が小さくなっていき、 -90° (左側臥位)のときに過小視が起こった (101.0%)。

大野 (1959)は、右向きの L 字型を用いて姿勢の影響を検討した。その結果、 0° (正立位; 107.0%)の方が 45° (101.4%)よりも過小視が有意に大きくなり、 90° (右側臥位; 107.7%)との間では差異がないことを報告した。Avery & Day (1969)も L 字型を用いて正立位と右側臥位による錯視量を検討した。その結果、正立座位の錯視量 (94.9%)の方が右側臥位の錯視量 (101.9%)よりも大きくなることを報告した。しかし、Avery (1970)は、追試でこれを否定している (正立座位:98.1%; 右側臥位:102.8%)。Prinzmetal & Gettleman

(1993)は、L 字（離脱）型を用いて、正立座位と側臥位(方向不明)による錯視量を検討した。その結果、正立座位の方（92.9%）が側臥位（95.2%）よりも大きくなると報告した。

Higashiyama (1996)や東山（1997, 2012）は、姿勢条件を正立位と側臥位にして、その際、観察条件を自然観察、円筒を覗きながらの観察および視野反転プリズム（上下と左右）とし、各条件の組み合わせによって計 8 条件にして、野外にある窓枠の長さを観察させた。その結果、重力軸、視環境軸、そして網膜垂直子午線が一致している場合がもっとも錯視が大きくなる（最大錯視量（正立位）：62.0%）ことを示した。

以上から姿勢の影響について、正立位 > 側臥位(Künnapas, 1958a; Avery & Day, 1969; Prinzmetal & Gettleman, 1993; Higashiyama, 1996; 東山, 1997, 2012), 正立位≒側臥位(大野, 1959; Avery, 1970), 正立位 < 側臥位 (Morinaga et al., 1962)となり、正立位 > 側臥位の支持が多い。これについては東山（2012）でも述べられている通り、重力軸との関係性が影響している可能性が高い。しかしながら、これまで無重力下で行われた研究がまだないことから、今後の研究が待たれるところである。同時に、観察する角度についても言及がなされていないため、この条件も考慮した研究を行う必要がある。

視覚以外の感覚系

VHI が視覚だけでなく、他の感覚系でも起こることを指摘する研究がある。図形が眼から入って脳で再現される過程で発生する VHI について、視覚と他の感覚系がどのようにお互いに影響しているかは、今後の別の面からのアプローチである脳神経科学の視点から考えるにあたり、とても必要なことであろう。そこで、以下には VHI について視覚以外の感覚系による影響を取り上げる。

触覚の影響 Sheridan (1966)は、帆線の角度を 5 段階（0～120°）にして、それぞれの長さが底線よりも長いかどうかを触診で比較させた。その結果、底線が長くなるほど比較する底線を長く見積もる観察者が増えることを示した。また角度が大きくなるほど、それが顕著になることを示した。

Day & Avery (1970)は、手指の動きだけでも VHI が起こるのか検討した。彼らは目隠しをした観察者に基準となる基本もしくは L 字型図形を示指で触診させ、次に比較刺激となる 16 種類の棒の中から同様に触診させ、二重段階法を用いて基線と同じ長さのものを選

扱させた。その結果、錯覚量は基本図形では 83.5%, L 字型では 101.5%であった。Deregowski & Ellis (1972)は、目隠しをした観察者の前の回転盤上に基本または L 字型図形 (底線: 75 mm)を置き、その図形を触診させた。その際、図形の向きを 7 段階 ($0 \sim 90^\circ$) に変化させて、帆線の長さを 25 段階 (40 ~ 100 mm)にした棒を用いて、二重段階法で PSE を調べた。その結果、 0° のときに基本図形の PSE (77.5%)の方が L 字型 (87.6%)よりも過大視が強くなった。さらに向きを変化させると、基本図形では 75° にかけて逆に長く知覚され (108.1%), 90° では再び短く知覚された (90.3%)。一方、L 字型では 0° から 90° にかけて長く知覚された (107.3%)。Heller, Calcaterra, Burson, & Green (1997)は、浮き彫りにした基本および L 字型図形を目隠しをした観察者に提示し示指のみでなぞるよう求めた。その後、底線および帆線の PSE は母指と示指を使って報告させた。その結果、錯覚は生じなかった。また彼らは、指だけの関節運動と肘だけの関節運動での触診を比較したが、錯覚は生じなかった。

VHI の現れ方に観察者が自ら身体を動かすことで情報を得られる能動触覚 (アクティブタッチ)と視覚で違いがあるか検討した研究も見られる。大坪 (1988)は基本図形を用いて、健常者の錯視量と目隠しをした健常者に対して図形全体を触らせた後に利き手の人差し指で触らせることで錯覚量を測定し、それぞれを比較した。その結果、それぞれが 83.3%, 80.2%となり、有意な差がないことを示した。Taylor (2001)は、2 本のストローを用い、底線が 152.4 mm と一定にして、帆線を 7 段階 (114.3 ~ 190.5 mm)に変化させた基本図形と L 字型図形をそれぞれ作成した。観察者には 7 種類の図形から底線と帆線が同じ長さに知覚されるものを選択させた。2 つの刺激に対して、2 つの探索条件 (触診のみ; 視覚のみ) が実施された。その結果、触診条件 (基本: 87.6%; L 字型: 96.8%)が視覚条件 (基本: 89.2%; L 字型: 98.4%)よりも、また基本図形が L 字型図形よりも、過大視が有意に強くなった。

上記の研究は、観察者のアクティブタッチによる能動的な探索によって錯覚の影響を調べたが、受動的な研究 (パッシブタッチによる研究)も見られる。Wong, Ho, & Ho (1974)は、アクリル板をくりぬいて底線は一定 (38.1 mm)で帆線の長さの異なる 13 枚の刺激 (19 ~ 58 mm)を作成し、その一枚を目隠しした観察者の手掌に置き、実験者が棒を用いて図形をなぞるという受動的な条件で、底線と同じ長さを感じる図形を二重段階法によって選ばせ PSE を求めた。その結果、逆 T 字型 (0°)において底線よりも帆線が短く知覚された (91.1%)。さらに手掌に置く向きを変化させると、 90° (96.5%)と 135° (98.9%)で有意な減弱が見られた。また L 字型 (0°)では長く知覚された (106.5%)。向きの影響は 90°

で短く知覚された (96.5%)。

以上まとめてみると、触診のみでも錯覚が起こる (Sheridan, 1966)ことから、様々なことが検討されている。

アクティブタッチでは、錯覚が生じたという報告 (Day & Avery, 1970; Deregowski & Ellis, 1972; Taylor, 2001)と生じなかったという報告 (Heller et al., 1997)に対立している。またアクティブタッチと視覚を比較した研究では、変わらないという報告 (大坪, 1988)とアクティブタッチの方が視覚による探索よりも錯覚が強くなったという報告に分かれている (Taylor, 2001)。刺激図形を回転させた実験では、向きによって錯覚量に影響があることが報告されている (Deregowski & Ellis, 1972)。アクティブタッチに関与する筋群の違いを調べた研究からは、手指運動と上腕運動による錯覚量の強さには影響がないことが報告されている (Heller et al., 1997)。

手掌に刺激図形を乗せたパッシブタッチでも、錯覚を認めている (Wong et al., 1974)。また刺激図形を回転させた実験では、向きによって錯覚量に影響があることが報告されている (Wong et al., 1974)。

このように触覚については、様々な視点から検討が行われている。観察者に触診などをさせるということは多かれ少なかれ筋肉を動かしていることに繋がる。筋肉の動きが影響する可能性があることは眼球運動の項目でも述べた通りであるが、手腕の動きであればより影響を与える可能性が考えられる。しかしながら、どの部位が最も影響を与えているかなどは今後さらなる研究を継続することが必要であり、このことが明確になれば、実験方法を統制する際に、より明確に統制することも可能となろう。

聴覚の影響 Renier, Bruyer, & De Volder (2006)は、聴覚機構 (system)にも VHI が生じるか検証するため、空間図形を音に変換する装置 (PSVA; 軸方向や長さなどの視覚パターンを音に変換する装置)を用いて、基本図形と L 字図形を音に変換して聴覚を通して知覚される長さに違いが生じるか検討した。その結果、基本図形ではほとんどの健常者で視覚 (錯視が起こった割合 : 99.5%)でも聴覚 (錯覚が起こった割合 : 87.0%)でも錯覚が生じた。しかし、L 字図形では視覚 (錯視が起こった割合 : 83.5%)に比べて、聴覚 (錯視が起こった割合 : 69.5%)では錯覚が有意に減弱した。一方、早期盲目者 (9 名)では錯覚は起こりにくかった (錯覚が起こった割合 : 基本 : 38.8%; L 字 : 52.5%)。

聴覚に関しては、多くの研究が実施されていないため、今の状態で結論を述べることは

早計であると考えられる。しかしながら、概ね錯覚が起こること、また長さの認識には視覚が大いに影響していることがこの研究から理解できる。

障がいの影響 角膜の障がいとして乱視を調べたものがある。乱視の場合、角膜形状の縦横比が変化することが知られており（山本, 2016）、それが VHI でも生じるのかは興味深い。Valentine (1912b)や Ritter (1917)は乱視の影響（L 字型）を調べ、低程度の乱視（ $\sim +1.5D$ ）では錯視量に影響はないと報告した。

大坪（1988）は基本図形を用いて、目隠しをした健常者と全盲者に対して図形全体を触らせた後に利き手の人差し指で触らせることで錯覚量を測定し、それぞれを比較した。その結果、それぞれが 80.2%、86.9%となり、有意な差がないことを示した。

Heller & Joyner (1993)は、先天盲者（9 名）、後天盲者（9 名）および健常者（目隠し；20 名）に対して浮き彫りにした基本および L 字図形（254 ~ 1016 mm; 4 段階）を示指のみでなぞり、錯覚量を求めた。その結果、健常者は L 字図形では錯覚を示さず、基本図形においては過大視が生じ、有意差を示す刺激（762 mm）も見られた（78.4%）。一方、先天盲者では基本図形だけでなく（80.8 ~ 92.4%）、ほとんどの L 字図形でも過大視が有意に起こった（82.2 ~ 88.5%）。後天盲者では全ての基本図形で過大視が有意に起こり（64.7 ~ 89.1%）、L 字図形では錯覚が起こらないことを報告した。

de Montalembert & Mamassian (2010)は、基本図形を右視野と左視野、そして両視野に提示して半側空間無視の患者（6 名）と右脳を損傷した患者（4 名）、そして健常者（12 名）の錯視量を比較した。その結果、どの条件の観察者でも錯視が起こることを確認した（健常者：94.8%；右脳損傷：90.9%；半側空間無視：90.1%）。また同時に半側空間無視患者では、基本図形の右向きと左向きで錯視量に有意な差が生じることも報告した（右向き：76.5%；左向き：88.9%）。

この項目では様々な障がいとの関連について述べた。様々な障がいがあるため一概には言えないが、障がいが VHI に影響を与える可能性についてはあるといえるのではないだろうか。

個人差

年齢の影響 Fraisse & Vautrey (1956)は、基本図形と L 字（離脱）型について 6 歳児（36

名)と9歳から10歳(55名)、高校卒業(47名)、教養学生(40名)、理系学生(43名)の間で錯視量を比較した。その結果、基本図形では差はなかったが、L字(離脱)型については順に78.3%, 79.0%, 81.3%, 80.0%, 88.3%となり、6~10歳の錯視量がもっとも大きく、以後教育環境に関わらず錯視は減少傾向だと報告した。Brosvic et al. (1993)は、基本図形とL字型を用いて3歳から20歳まで1歳ごとに錯視量を測定した。その結果、基本図形では年齢が上がるに従って錯視量が減少傾向を示すが(3歳:73.2%; 20歳:91.4%)、特に10歳から11歳にかけて大きな減少傾向が見られた。L字型では、3歳から6歳かけて錯視量が増大し6歳で最大となり(81.4%)、8歳から9歳で顕著な減少を示し、11歳付近から錯視量はほぼ一定になることを報告した(93.6%)。なお彼らは物理的には同じ長さの帆線と底線を単独で提示して知覚される長さを測定したところ、いずれの年齢でも底線よりも帆線の方をより短く知覚したことを報告した(72.5% > 84.7%)。さらに、年齢における直線の感受性について検討し、帆線については8歳のころが最も大きく、13~14歳で急激に減少し(87.5%)、15歳ではほぼ成人と同程度になった(86.5%)。一方、底線については3歳から15歳までほぼ直線的に減少し、その後成人と同程度になった(93.5%)。

年齢比較については統制を取ることが非常に難しく、本当に年齢のみの影響なのかを証明することが難しいといえる。それは年齢が上がると様々な経験も増えることから、年齢のみの影響をみることは事実上不可能に近いからである。しかしながら、本論文から言えることは、年齢が何かしらVHIに影響を与えているということである。

性差の影響 Fraisse & Vautrey (1956)は、前述の観察者を対象にして性差も検討した。その結果、基本図形では、性差は見られなかったが、L字(離脱)型については一部(9~10歳群; 教養学生群)に性差が見られた。Thompson & Schiffman (1974)は、逆L字型を用いて一部の条件で女性(97.9%)よりも男性(95.8%)で錯視量が有意に大きくなることを報告した。Brosvic et al. (1993)は、基本図形とL字型を用いたが、どちらの図形でも性差が見られないと報告した。同様に Blanus & Zdravkic (2015)は、基本図形において性差が見られないことを報告した。

性差についてはこれまでから様々な分野で研究が行われており、現在に至るまで研究者にとって興味の強い項目の1つである。今回の本論文の結果からは基本図形については差がないと言って良いと考えられる。しかしながら、基本図形以外についてはまだ検討の余地が残っている。

また長谷川・早坂 (2012)の研究によると、ストループ効果のように色彩により男女で見え方に差があるという結果もある。そのことから、今後は提示図形の色も検討課題となりうる可能性がある。

学習の影響 学習によって、VHI の錯視の方向や錯視量が消失したり、増大したり、あるいは一定であるということを明らかにすることは VHI の情報処理が生得的なものか、経験的なものかを判断するうえでは重要なものと考えられる。

Vette (1964)は、基本図形や L 字図形を各 30 名の観察者に暗闇で右眼のみで観察させた。その際、観察者の半分には底線における帆線の長さを計測させ、残り半分には逆に帆線における底線の長さを計測させ、1 試行から 10 試行 (以下、経験無)と 51 試行から 60 試行 (以下、経験有)の平均値を比較した。その結果、基本図形は錯視量が有意に小さくなる (経験無 : 85.75%; 経験有 : 92.19%)が、逆に L 字図形は錯視量が有意に大きくなる (経験無 : 97.31%; 経験有 : 94.01%)ことを示した。

村井・石井 (2015)は、4 名の観察者に基本図形の底線を基準として帆線と同じ長さに調節させた。これを 1 試行として 20 回練習させた方 (84.5%)が練習させなかった方 (80.9%)よりも錯視量が減弱することを示した。

以上のことから、元来錯視には学習の効果 (練習効果)が存在することが知られていたが、実験的にも明らかとなった。

学術経験 Fraisse & Vautrey (1956)は、初等教育卒、高卒未満、教養系大卒、科学系大卒、そして心理学部の学生を対象にして基本図形と L 字 (離脱)型の錯視量を測定した。その結果、基本図形では教養系大卒 (87.7%)に比べ心理学の学生 (90.3%)の方が過大視が小さくなることを示したが、L 字 (離脱)型では、学術経験に影響がないことを報告した。Edwards, Brosvic, & Dihoff (1993)は建築や自然科学などを学んだ観察者の方が、理髪や自動車修理などの実学を学んだ観察者や社会科学を学んだ観察者よりも基本図形の過大視が有意に大きくなることを報告した。しかしながら、L 字型は差がないことを報告した。

このような学術的経験が錯視に影響するのかわからないのかは認知的な影響を推し量る上では重要である。しかしながら、単に観察者の学年などの背景で比較するのではなく、知識面や経験などにより区分するなど実験統制をより綿密に行う必要があり、先行研究からだけでは結論付けることは難しいと考えられる。

第4項 要因別の結果と課題

本調査では、これまで研究されてきた数多くの文献から VHI を引き起こす諸要因について一貫して観察できる、すなわち普遍性のある現象を見出すために、提示図形に関する要因（物理的要因）と観察者側からの要因（観察者要因）とに分類・分析して明らかになった結果とこれからの課題について考察した。

物理要因

刺激図形 刺激そのものがもつ物理的特性が、VHI の現れ方や強さに一貫して影響があると認められたのは以下の3要因である。第一に、接点位置が中点である基本図形では、垂直線分が水平線分よりも10%程度短く見えることである。すなわち過大評価が生じて底線よりも帆線が短く知覚された（Finger & Spelt, 1947; Künnapas, 1955a; 大野, 1959; Suto, 1960; Cormack & Cormack, 1974; Carven, 1993; Wolfe et al., 2005; Hamburger & Hansen, 2010; Mikellidou & Thompson, 2013; Marma et al., 2015）。第二に、接点位置が端点である L 字および逆 L 字では、垂直線分が水平線分よりも3%程度短く見えることである。すなわち過大評価が生じて底線よりも帆線が短く知覚された（Ritter, 1917; Künnapas, 1955a, 1957b; Suto, 1960; Morinaga et al., 1962; Avery & Day, 1969; Cormack & Cormack, 1974; Schiffman & Thompson, 1975; Wolfe et al., 2005; Mikellidou & Thompson, 2013; Marma et al., 2015）。第三に、刺激図形の向き、すなわち左右方向に対する影響である。基本図形や T 字図形と比較して、左右に回転させた図形（┠・┡）は錯視量が接点位置にかかわらず全体的に減弱した（Künnapas, 1955a; Marma et al., 2015）。この結果は L 字や接点位置に関わらず一様に生じることから、縦と横の比率が本質的に異なっている（異方性）と考える研究者も多い。要するに、縦方向での錯視の方が横方向での錯視よりもより強く起こることを示している。

一方、結果が対立していたり、VHI との関係性が不明確と認められた要因は以下の通りである。第一に、中点と端点の間に接点位置がある場合である。その VHI の現れ方や強さについては、中点を底とする V 字型（Künnapas, 1955a）、イチョウ型（Wolfe et al., 2005）、逆に中間で錯視量が増大する M 字型（Marma et al., 2015）など結果が分かれている。第二に、観察者の矢状方向、すなわち前後方向に傾けた図形に対しては、錯視量変化は右下が

り (von Collani, 1985b)あるいは W 型のプロフィール (安岡・石井, 2014)とに結果が分かれている。第三に、刺激図形の大きさの要因である。刺激が大きい方が錯視が強くなるという結果 (Pollock & Chapanis, 1952)と影響はないという結果 (Valentine, 1912a)で対立していた。

これらのことから、第一に中点と端点の間の接点位置を組織的に操作したとき (cf. 小原・川合, 2020a), 第二に図形を矢状方向に系統的に傾けたとき (cf. 小原・川合, 2021), 第三に刺激の大きさに距離要因を加えたときの VHI の変化プロフィールをそれぞれ得ることが必要である。この結果によって VHI の認識には形状が影響しているのか, それとも奥行知覚などの位置が影響しているのかが明らかになる。このことにより, 脳において錯視が発生する場合の経路が, 物体の形状を把握する側頭葉経路 (藤田, 2007)を用いているのか, 物体の位置を把握する頭頂葉経路 (藤田, 2007)を用いているのかを検討する材料となり, 錯視の発生機序解明に寄与できるのではないかと考える。

実験環境 刺激を提示する実験環境に属する物理的要因については、提示時間を除いて一貫した知見はほとんど見られなかった。第一に、実験室の明るさについては、暗所視 (0 ~ 0.01 lx)よりも明所視 (10 lx 以上)の方が錯視量が有意に減弱したという結果 (Künnapas 1957b)と、変わらなかったという結果 (Ritter, 1917; Avery & Day, 1969)が対立していた。また薄明視 (0.01 ~ 10 lx)では錯視量に変化が無かったという報告も見られた (江草・御領, 1998)。第二に、刺激図形を囲む背景については、横長の枠に比べて縦長の枠の方が錯視量が有意に小さくなるという結果 (Künnapas, 1957a, 1959)と逆に大きくなるという結果 (大野, 1959; Prinzmetal & Gettleman, 1993), あるいは変わらないという結果 (Houck et al., 1972)で対立していた。第三に提示時間については、概ね一貫した結果が得られていた。100ms 程度の提示に比べ、提示時間が長くなるほど錯視が減弱した (Faisse & Vautrey, 1956; Piaget et al., 1958)。

これらのことから、第一に部屋の明るさを暗所視から明所視まで段階的に変化させたとき錯視の現れ方や強さ (cf. 小原・川合, 2020b), 第二に図形を囲む背景の形状, 大きさ, 色合い, 複雑さなどそれぞれの要素を距離要因を配慮した上で段階的に操作したときの錯視の現れ方や強さを測定することが必要である。このことによって、人間の視覚に大きな影響を及ぼす環境要因が明らかになるため、今後視覚に関する研究を行う際に重要な知見を得られると考えられる。

観察者要因

観察方法に属する要因 観察方法に関して、VHI の現れ方や強さに共通して影響があると認められたのは以下の 2 要因であった。第一に、眼球運動の要因で、観察者に注視させた方が自由観察させるよりも錯視がより強くなるという結果であった (Künnapas, 1958b; Chouinard et al., 2017)。第二に、他感覚の要因であった。すなわち、アクティブタッチを用いても聴覚を用いても VHI は一貫して現れた (Day & Avery, 1970; Deregowski & Ellis, 1972; Heller et al., 1997; Taylor, 2001; Renier et al., 2006)。

一方、結果が対立していたり、VHI との関係性が不明確と認められた要因は以下の通りである。第一に単眼視と両眼視については、Valentine (1912a)や Vette (1964)は左右差に触れ、右単眼視の方が左単眼視より錯視が強くなると報告し、Kunnapas (1957c)は提示図形により異なることを示した。しかし、利き目と非利き目を考慮しておらず、Prinzmetal & Gettleman (1993)が利き目と非利き目を考慮した上で単眼視が両眼視よりも錯視が弱くなることを示したが、利き目と非利き目の比較は行わなかった。

第二に、中心視と周辺視については、中心視で錯視図形を観察した時の方が左右方向の周辺視のそれよりも錯視が強くなるという結果 (Pearce & Matin, 1969)と逆に弱くなるという結果 (Thompson & Schiffman, 1974)で対立していた。また上下方向の周辺視では、中心視の方が錯視が強くなった (Pearce & Matin, 1969)。第三に、観察者の姿勢に関する要因である。つまり、側臥位では正立位よりも錯視が減弱するという知見 (Künnapas, 1958a; Avery & Day, 1969; Prinzmetal & Gettleman, 1993; Higashiyama, 1996; 東山, 1997, 2012)が多い。しかし、影響がない (Ritter, 1917; 大野, 1959; Avery, 1970), あるいは側臥位で錯視がより強くなるという知見 (Morinaga et al., 1962)も見られる。

これらのことから、第一に利き目・非利き目あるいは左右差を十分考慮した上での単眼視および両眼視を用いたとき (cf. 小原・川合, 2020a), 第二に注視線を厳密に制御できる環境下で中心視と周辺視を用いたとき, 第三に姿勢軸を厳密に制御できる環境下で, 重力軸と姿勢軸 (網膜子午線)間の角度変化を段階的に行ったときのそれぞれの変化プロフィールを得ることが課題であろう。これらによって、視覚に関する研究を行う際に重視しなければならない要因を特定することができ、より明確な研究を行うことができると考えられる。

個人差の要因 個人差が VHI の現れ方や強さに共通して認められたのは以下の 3 要因である。第一に、年齢の影響については 6 歳付近で錯視がもっとも強くなり、それ以降年齢が進むに従い錯視が弱くなった (Fraisse & Vautrey, 1956; Brosvic et al., 1993)。第二に、学習の影響については、練習回数が少ない方が多い方よりも錯視が強くなった (Vette, 1964; 村井・石井, 2015)。第三に、学術経験の有無については、錯視の現れ方に差がなかった (Fraisse & Vautrey, 1956; Edwards et al., 1993)。

一方、対立していた要因は性差の影響であった。VHI に影響がないという知見 (Brosvic et al., 1993; Blanus & Zdravkic, 2015) と、男性の方が錯視が強くなるという知見 (Thompson & Schiffman, 1974) が見られる。

これらのことから、個人差に関しては性差についてまだ議論の余地が残されている。

第 5 節 本論文の構成

先述したことを果たすため、VHI に関する研究に対して、以下のような構成で進めることにした。第 1 章では、本研究課題に至るまでの背景および問題提起、研究対象として錯視を選び、幾何学的錯視の中から VHI を選択した背景、そして研究目的および研究意義について述べた後、150 年以上の歴史をもつ VHI に関する文献調査を行った。そこでは Fick (1851)以降、報告されてきた学術論文や著書のうち、入手できた 100 編以上の論文を、提示図形に属する要因 (物理的要因) と観察者に属する要因 (観察者要因) の観点から整理し、VHI に関する普遍的な現象を明確化するとともに、本研究の研究目的実現に重要と考えられる知見や課題を抽出した。

第 2 章から第 5 章までは、第 1 章で導出された諸課題に関する実験を行い、その解析結果からそれぞれの課題を考査した。なお、第 2 章から第 4 章はそれぞれ既に公表された学術雑誌に基づいて構成されている (小原・川合, 2020a, b, 2021)。

第 2 章では、VHI について接点位置や向き、単眼視と両眼視の二つの要因について検討した。接点位置をとりあげた理由は、先行研究において逆 T 字、T 字、L 字、逆 L 字など、さまざまな接点および向きをもつ刺激図形が用いられてきたことが、VHI の発生機序解明を遅らせたからではないかと考えたからである。そこで、これまで用いられてきた刺激図形を一つの枠組みとして捉えるために、垂直線と水平線の接点位置および向きを組織的に変化させ、VHI の動態を連続的に観察することにした。先行研究においても、組織的な研

究は見られるが、接点位置による VHI の錯視量の変化は意見が対立している (Künnapas, 1955a; Wolfe et al., 2005; Marma et al., 2015)。単眼視および両眼視をとりあげた理由は、先行研究において、VHI への影響について議論が分かれていたからである (Künnapas, 1957c; Harrington, 1981)。

第 3 章では、部屋の明るさと VHI の錯視量変化との関係について詳細に検討した。その背景には、視覚情報処理は、明暗に応じて錐体細胞および桿体細胞が巧みに関与している。それゆえ、明暗と VHI の動態との関係性を明確することにより、それぞれの視細胞の機能をより明確化できる可能性があると考えたからである。

VHI への明暗の影響に関する先行研究は散見されるが、組織的な研究はほとんどない。また、暗所視の方が明所視よりも錯視の強さが減弱するという報告 (Künnapas, 1957b) と明るさには影響を受けないとする報告 (Avery & Day, 1969) が対立していた。そこで、明所視、薄明視および暗所視を組織的に取り扱い明暗の影響について検討した。

第 4 章では、観察者の俯仰瞰角度と錯視量変化との関係について詳細に検討した。筆者は、VHI は垂直軸と水平軸の 2 つの座標軸の関係性において生じる視空間処理の異方性を反映していると考えている。そして、この両座標軸の異方性の質と量を定量化するためには、実験に際して、提示する錯視図形の平面と観察者の視軸とは常に直交が保たれることが必須であると考えられる。なぜなら、観察者が図形を俯瞰（上から見下ろ）したり、仰瞰（下から見上げたり）すると、剰余変数が錯視量に大きく関与し、二軸の関係性を崩壊してしまうからである。先行研究では、上記の条件が統制された研究は散見されるだけであり、観察者の俯仰瞰要因が、錯視量の動態を安定させなかった原因となったのではないかと考えている。また、観察者の俯仰瞰角度に関する先行研究では、観察者の視軸と対象が直交する附近で錯視が強く現れることはコンセンサスが得られているが、さらに前後に傾斜させたときの知見が少なかった (von Collani, 1985b; 安岡・石井, 2014)。

そこで刺激図形を観察者の水平視軸に対して直交を基準として、手前側および奥側に傾け、かつ接点位置を組織的に変化させ、錯視量がどのように変化するかを検討した。さらに、接点位置との関係性についても言及した。

第 5 章では、VHI の発生機序理論において、現在も多くの支持を受けている「分割理論」を検証した。この理論は、逆 T 字図形が L 字図形よりも、垂直線の過大視が顕著に現れるということから「分割」が錯視の原因とするものである。そのため、前章の二線の相互作用を排除するため、二線をそれぞれ単独提示し、それでもなお、垂直位におかれた線分と

水平位におかれた線分には、異方性が生じるのかを検証した。実験では、Holway & Boring (1941)の提案する大きさ・距離不変仮説および方法論を参考に実施した。得られた結果は、大きさ（長さ）・距離不変関数を足掛かりに、VHI の発生機序に関するモデルとして垂直線と視距離の関係性を挙げて提案した。

最終章（第 6 章）では、積み重ねてきた実験から得られた結果および考察を概観し、そこから明らかになってきた、人間の視知覚機構について考察を述べることにした。そして、今後の課題について述べた。

第2章 接点位置，向きおよび単眼・両眼視が錯視量変化に及ぼす影響

第1節 要因と実験仮説

VHI とは、物理的に同じ長さの垂直線分と水平線分を逆 T 字型「⊥」あるいは L 字型「└」にして観察した際に、水平線に比べて垂直線が長く見える錯視現象をいう (Fick, 1851; Oppel, 1855; 大山, 2005; 北岡, 2005, 2010)。この錯視は Fick (1851)により初めて紹介されたことから「Fick illusion」とも呼ばれている (北岡, 2005)。以後、この現象の成立要因を巡って多くの研究がなされてきた。我が国でも早くから紹介されてきたが (野上・上野, 1909; 大槻, 1911), ミュラーリアー (城戸, 1927), 同心円 (盛永, 1935), ツェルナー (盛永, 1933; Oyama, 1975), ポンゾ (和田, 1971; 牧野・加藤, 1972; 山上, 1977, 1978; Oyama & Morikawa, 1985; Fujita, Blough, & Blough, 1993)などの錯視に比べ、また、諸外国と比較しても組織的には検討されて来なかった (大野, 1963, 1966; 福田・伊藤・苧阪, 1982)。

一方、諸外国における VHI の成立要因に関する研究を整理してみると、大きく物理的要因と観察者要因に分けることができる。物理的要因とは、基本図形「⊥」を構成する2本の線分の相対的な位置関係を操作したり、あるいは図形を提示する背景などの物理的環境を操作したりすることによって VHI の特性や発生機構の手がかりを明らかにしようとした刺激に依存する要因である。一方、観察者要因とは、観察者の観察条件、姿勢、個人差など観察者側に内在する要因である。

物理的要因のうち、基本図形「⊥」を操作した研究には、「└」(L字型)のように垂直線の接点位置 (Künnapas, 1955a, 1957b; Suto, 1960; Mikellidou & Thompson, 2013; Marma, Bulatov, & Bulatova, 2015), 「┐」や「┌」のように図形の向き (Ritter, 1917; Finger & Splet, 1947; Künnapas, 1955a; 大野, 1959; Morinaga, Noguchi, & Ohishi, 1962; Begelman & Steinfeld, 1967; Avery & Day, 1969; Schiffman & Thompson, 1975; Hamburger & Hansen, 2010; Marma et al., 2015), 「∠」のように平面上 (観察者の冠状面)で二線の成す角 (Suto, 1960; Morinaga et al., 1962; Cormack & Cormack, 1974; Wolfe, Maloney, & Tam, 2005), さらに奥行方向 (観察者の矢状面)で二線の成す角を操作したり (von Collani, 1985b; 安岡・石井, 2014), 直線の輪郭を変化させたり (Meyer,

1986), 基準線を除いたり (McBride, Risser, & Slotnick, 1987)して VHI の錯視量や現れ方を検討したものがある。

物理的要因のうち図形を提示する物理的背景を操作したものについては, 図形の大きさ (提示距離) (Valentine, 1912a), 図形を取り囲む背景 (地) (Künnapas, 1955b, 1957a, 1959; 大野, 1959; Mankin, 1969; Houck, Mefferd, & Greenstein, 1972; von Collani, 1985a; Li & Durgin, 2017), 実験室の明るさ (Ritter, 1917; Künnapas, 1957b; Avery & Day, 1969; 江草・御領, 1998; Hamburger & Hansen, 2010), さらに刺激の提示時間 (Fraisse & Vautrey, 1956; Piaget, Bang, & Matalon, 1958)を操作したものなどがある。

一方, 観察者要因のうち観察の条件に関するものには, 単眼視と両眼視 (Valentine, 1912a; Künnapas, 1957c; Prinzmetal & Gettleman, 1993), 中心視と周辺視 (Künnapas, 1957b, Pearce & Matin, 1969; Thompson & Schiffman, 1974), 眼球運動 (Künnapas, 1958b; Piaget et al., 1958), 姿勢 (Ritter, 1917; Künnapas, 1958a; 大野, 1959; Morinaga et al., 1962; Avery & Day, 1969; Avery, 1970; Prinzmetal & Gettleman, 1993; 東山, 1997), 触覚 (Day & Avery, 1970; Deregowski & Ellis, 1972; Wong, Ho, & Ho, 1974; Wong, 1977; Heller, Calcaterra, Burson, & Green, 1997; Taylor, 2001), 能動触覚 (von Collani, 1979; Heller et al., 1997; Millar & Al-Attar, 2000), 見えの長さ (Ritter, 1917; Armstrong & Marks, 1997), 学習 (Valentine, 1912b; 村井・石井, 2015)などとの関係が調べられている。また個人差要因については, 性差 (Fraisse & Vautrey, 1956; Thompson & Schiffman, 1974; Brosvic et al., 1993; Blanus & Zdravkic, 2015), 脳部位の障がい (Valentine, 1912b; Ritter, 1917; Heller & Joyner, 1993; Renier, Bruyer, & De Volder, 2006; Savazzi, Posteraro, Veronesi, & Mancini, 2007; de Montalembert & Mamassian, 2010)の影響あるいは個人差 (Finger & Spelt, 1947; Wolfe et al., 2005; Hamburger & Hansen, 2010)に注目したものなど多岐におよぶ。

しかし, このように長い歴史であるにも関わらず, VHI の知見の普遍性, 再現性およびその発生機序については理解やコンセンサスが十分得られておらず, 未だに議論が続いている (de Montalembert & Mamassian, 2010; Hamburger & Hansen, 2010; Mamassian & de Montalembert, 2010; Mikellidou & Thompson, 2013)。このような背景には, 第一には, 刺激図形や実験環境をはじめとして VHI に影響する物理的要因の特定とその統制が不十分だったことにある。たとえ二本の線分で構成された単純な図形であっても, 人間の視知覚機構全体を通して処理されていることに注意すべきであろう。つまり単純な錯視図

形においても、輻輳、両眼視差、明暗、色彩、輪郭処理などを経て、図と地、恒常性、奥行、俯瞰などの空間や物体の知覚処理が行われていることを常に考慮していなければならない。第二に、観察者側の要因統制についてである。後藤・田中（2005）は、錯視全般の研究においては「どのように刺激条件を統制しても、多様な錯視の見え（錯視量）とそれらの変化の正確な予測はきわめて難しく、錯視研究者を悩ませてきた“主体的条件（観察者の構えや個体差）の影響”は、ときに錯視の方向（過大視・過小視）を変えてしまうことさえある」と個人差が大きいことについて言及している。しかしながら先行研究の中には、実験参加者がかなり少なかったもの（ $n < 10$ ）や、統計的な検定が明確でないものなどもいくつか見られた（Wolfe et al., 2005; Hamburger & Hansen, 2010）。

先人たちの知見を手がかりに錯視の成立要因を正確に捉えることは、その背後にある人間の視知覚機構の理解に近づくことを意味しており、また VHI の正しい理解は他の錯視図形（Ex. ヘルムホルツやオッペン・クント錯視など）の生起への理解にもつながり意義があると考えている（Oyama, 1960; Gregory, 1963, 1997; Coren & Girgus, 1978）。

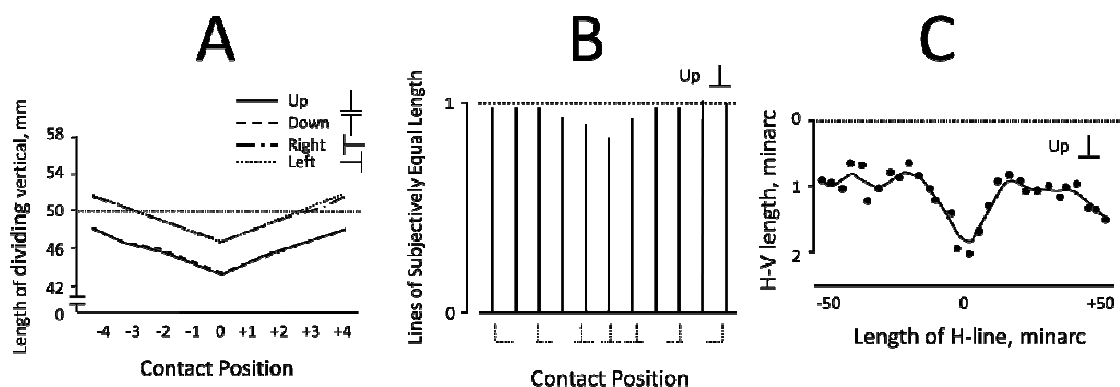


Figure 5 VHI の錯視量の定量的変化 (A: Künnapas, 1955a, p.136, Figure 4; B: Wolfe et al., 2005, p.971, Figure 4-D; C: Marma et al., 2015, p.71, Figure 2-a)

V字型の錯視量曲線は、Künnapas (A; 1955a) と Wolfe et al. (B; 2005) によって接点位置の関数として示され、M字型の錯視量曲線は Marma et al. (C; 2015) によって報告された。A では VHI の図形の向きに関係なく、錯視量曲線は「V字型」を維持していた (Künnapas, 1955a)。基準線はそれぞれ 50 mm (A), 27.3 mm (B), 66 minarc (C)であった。比較しやすいように図を修正した。日本基礎心理学会より使用許可を得て小原・川合 (2020a) から抜粋した。

それゆえ本研究では、先行研究において追試や現象の再現性が確認されていない要因あるいは追試されたが結果が対立しているものについて焦点を当てることにした。注目した要因は、物理的要因として二本の直線分の接点位置および図形の向きの影響であり、観察者要因として両眼視・単眼視を取り上げた。

接点位置の影響を検証することは、逆 T 字型や L 字型など異なる刺激図形を一つの枠組みでとらえるために重要である。VHI の現象がとらえきれなかった理由の一つは、研究者が異なる刺激を用いてきたことにある。これまでも一つの枠組みで捉えた研究は散見されるが、結果は必ずしも一致していない (Künnapas, 1955a; Wolfe et al., 2005; Charras & Lupiáñez, 2010; Marma et al., 2015)。Figure 5 (p.43)に示すように、他の多くの先行研究を含め、中点がもっとも錯視の影響を受けることについてはコンセンサスが得られている。しかし、中点と端点間に対する影響については、中点を底とする V 字型 (A: Künnapas, 1955a ; B: Wolfe et al., 2005)と中点と端点間でむしろ逆方向に錯視が生じる M 字型 (C: Marma et al., 2015)の二つの主張が対立している。

次に、図形の向きの影響についても、接点位置と同様の理由から一つの枠組みで展望する必要がある。これまでの結果では、基本図形「⊥」を 90 度回転させた図形「┘」や「└」の方が錯視は減弱するという報告 (Figure 5-A; p.43; Künnapas, 1955a)が見られるが有意性は確認されていない。なお本研究では、向きの影響を検討するために、VHI 図形を回転することになる。その際、直角に交わる二本の線分に対して「垂直線」および「水平線」を用いると混乱を生じることになる。それゆえ、逆 T 字 (⊥)図形を基本図形と定義し、基準となる線分を「底となる線分」または「底線 (baseline)」と呼び、調整される線分を「帆となる線分」または「帆線 (mast line)」と定義した。それゆえ、(⊥)や(└)では「底線が水平位で、帆線が垂直位」と表現し、(┘)や(└)では「底線が垂直位で、帆線が水平位」と表現することにした。

最後に、単眼・両眼視の要因については、両者に影響はないとする Künnapas (1957c)の報告と単眼視の錯視量が両眼視のそれよりも強かったとする Harrington (1981)の報告が対立している。

実験仮説として、仮説 1 (接点位置)については、暗室環境における錯視の強さは中点で強く、端点に近づくほど中点より弱く、中点と端点間ではさらに弱くなるため、得られる結果が「M 字型」になるという Marma et al. (2015)の結果を採用した。

この背景として、まず、接点位置に関する対立結果が、刺激図形の背景や枠組みの影響

によるものと考えた。すなわち、先行研究によれば、刺激を提示する背景 (Ritter, 1917; Künnapas, 1957b; Avery & Day, 1969; 江草・御領, 1998; Hamburger & Hansen, 2010), さらには刺激図形を取り囲む背景 (地) (Künnapas, 1955b, 1957a, 1959; 大野, 1959; Mankin, 1969; Houck et al., 1972; von Collani, 1985a; Li & Durgin, 2017)によって錯視の現れ方あるいは錯視量に影響することが報告されてきた。

例えば、楕円を用いると横長の方が縦長よりも水平線の長さより垂直線を短く知覚した (Künnapas, 1957a), ドット背景のドット数が増えると水平線の長さより垂直線を短く知覚したが、錯視量は小さくなった (Mankin, 1969), 奥行手がかりと提示した二線の角度が大きくなると水平線の長さより垂直線を短く知覚したが、錯視量は小さくなった (von Collani, 1985a), 反対に、長方形では錯視量に変化がなかった (Houck et al., 1972)といった報告が見られた。

次に明暗環境に関しては、背景や枠組みの影響を考慮し、Prinzmetal & Gettleman (1993)は実験を暗室で行い、Marma et al. (2015)も暗室で行い、照度を最小にした PC 画面上に二本の線分だけを浮かびあがらせた。また、Künnapas (1955a)は明暗に関する詳細な記述はないが、少なくとも白い正方形の厚紙 (210×210 mm)の上に刺激図形を描き、それに照明を当てて観察者に提示し (p.135), Wolfe et al. (2005)は、同じように白地のフレーム上に刺激図形を提示し、PC 上で 96 cd/m²の輝度を与えている。このように刺激提示方法の違いが結果の差異を引き起こした可能性がある。

このため、本研究は Prinzmetal & Gettleman (1993), Marma et al. (2015)の方法を採択して、明室環境では背景や枠組みなどの影響が表れる可能性があり、それらの要因を統制するために暗室環境で実験を行い、得られる結果を「M 字型」とした。

次に、仮説 2 (図形の向きの影響)については、基本図形 (⊥)や (⊢)のように底線が水平位で帆線を垂直方向に延ばした方が、回転図形 (⊥)や (⊢)のように底線が垂直位で帆線を水平方向に延ばした方よりも、帆線が短く知覚される錯視 (PSE < 100%)が強く生じるとした。その根拠は、VHI の原因が、単に同じ長さの線分が直交で接することによって生じるだけでなく、そもそも垂直軸と水平軸とにはスケーリングの比率の差異、すなわち「異方性 (anisotropy)」が存在するという Fick (1851)の提言、および、その事実が多くの先行研究で確認されているからである (Finger & Spelt, 1947 ; Künnapas, 1955a; Gardner & Long, 1960; Hamburger et al., 2007 ; Hamburger & Hanse, 2010; Mamassian & Mountalembert, 2010)。

最後に、仮説 3 (単眼視や両眼視)については、Künnapas (1957c)は錯視の強さについて両者に差異はないとし、市川 (1977)は奥行弁別率について距離にかかわらず両者に差がないとしたことから、仮説として差がないとした。

第 2 節 方法

第 1 項 実験参加者

健康な 35 名の実験参加者 (男性 20 名, 女性 15 名; 22.2 ± 2.2 歳)が同意の上, 実験に参加した。すべての実験参加者は, 課題遂行に支障を与えるような知覚運動機能および視覚機能はなかった。なお日常生活において眼鏡やコンタクトを着用している実験参加者はそれらを着用して課題を行った。本研究は, 帝塚山大学研究倫理委員会の承認 (28-05)を得た。

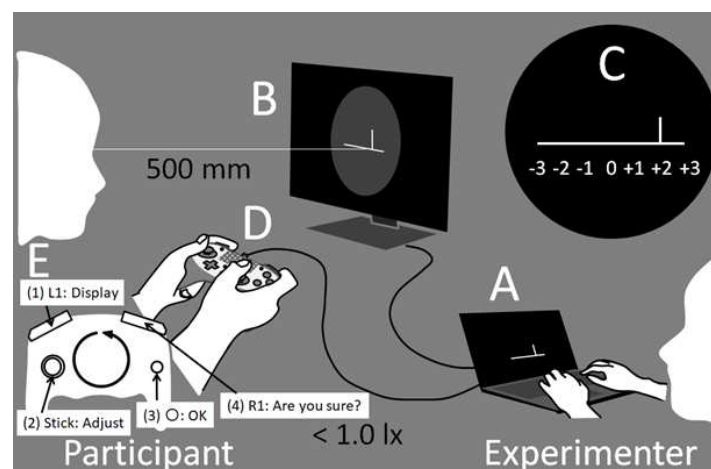


Figure 6 実験の模式図

暗室 (<1.0 lx)において, 実験参加者から 500 mm 離れた PC 画面 (B)にコンピュータ (A)から生成された刺激が提示された。図 (C)は底線 (50mm)と 7 つの接点に接続された様々な長さの帆線からなる。この図は, Up (⊥)条件での試行の一例で, 基準線は水平線であり, 接点位置は+2 である。実験参加者は, コントローラ (D)のボタンとジョイスティック (E)を操作して, 帆線が底線と同じ長さになるように長さを調整した。日本基礎心理学会より使用許可を得て小原・川合 (2020a)から抜粋した。

第2項 刺激と装置

Figure 6 (p.46)に実験系の概略図を示した。実験刺激 (VHI 図形)の制御, 操作およびデータの記録は, Marma et al. (2015)と同様に PC (Windows 7)上で行った (Figure 6-A; p.46)。Visual Studio 2012 (Microsoft 社製)を用いて, 以下のように刺激提示, 帆線の調整, 各試行の記録ができるプログラムを作成した。

刺激は, 実験参加者の前に, 机面に対して垂直に設置されたフルフラットで最も暗い明度の PC 画面 (㈱シャープ製, 15 inch 液晶カラーモニタ, LL-T15G4-H, Japan; cf. Wolfe et al., 2005)上に, 底となる長さ 50 mm (172 pixel), 幅 3 mm (10 pixel), 白色の底線 (標準刺激)が提示された。この底線は, 向き条件に応じて水平にも, 垂直にも設定できた (Figure 6-B; p.46)。一方, 実験参加者が長さを調整する帆となる帆線 (比較刺激, 幅 3 mm, 白色)は, 基準線を 7 等分した (Figure 6-C; p.46)いずれかの接点位置から疑似ランダム的に提示することができ, その点から, 向き条件に応じて常に底線に対して垂直方向に線分が伸縮できるようにした。なお底線とともに提示される帆線の長さの初期値 (30 ~ 70 mm)はランダムに変更できるようにしたが, 底線よりも短い場合 (上昇系列)と長い場合 (下降系列)の発生頻度は各条件で等しくなるようにした。

次に, 帆線の調整は, 実験参加者の前に置かれた, ゲームコントローラ (㈱ホリ製, HORIPAD FPS PLUS, Japan)の左側のジョイスティック (左, Figure 6-D; p.46)を用いて実験参加者自らが指先運動で調整できるようにした。操作に不慣れな実験参加者でも, また暗室でも容易に操作できるよう配慮した。すなわち①[L1]ボタンを押すと図形表示, ②[ジョイスティック (左)]で帆線の長さ調整, ③[右○]ボタンを押すと終了, ④[R1]ボタンで確定の 4 操作であり, これら一連の操作は反時計周りに設定することで, 容易に 1 試行が終了されるようにした (Figure 6-E; p.46)。なお, ④は実験参加者が視覚的に再確認をする上で重要だった。したがって[R1]ボタンで終了しない限り, 再度調整することが可能だった。また, モニターの左上には上記の操作手順が文字表示された。

実験参加者が[R1]ボタンを押すと, その試行の PSE データは, 自動的に条件や実験参加者の情報とともに記録され, その後の分析に用いられた。ジョイスティックの移動方向と帆線の伸縮方向は一致させ 3 pixel/秒で描画させた。帆線の解像度は 1 pixel (約 0.29 mm)だった。

なお, 本研究の調整法は実験参加者の試行数を少なくし, 負担を少なくする一方で, 繰

り返し試行による適応の影響の可能性を排除することができる。しかし一方で眼球運動の影響 (Wundt, 1897)の関与は否めないが、ミュラーリアー、ツェルナー、ポンゾなど他の錯視において、本研究の調整法と他の測定法とに差異は認められないことからこの調整法を採用した。また、ジョイスティック操作による能動触覚からの影響 (Heller et al., 1997)も鑑み、上記④の操作をいれ、実験参加者が最終的には能動触覚情報よりも視覚に依存して PSE を決定するよう配慮した。

第3項 背景に関わる物理的環境の統制

第1節で述べたように、仮説1の設定において背景要因の統制は重要であると考え、まず実験室の室内灯を消し、PCを含む実験室の背景を埋没させた。次にPC画面の背景色を黒色にするだけでなく、中央を丸くくり抜いた黒色の板(直径195 mm)でPC画面を覆い、PC画面のフレーム自体も背景に埋没させた。結果的に実験はPC画面の明るさのみで、その明るさを1.0 lx未満とした。なお実験室の消灯や点灯の際には、実験参加者の明暗順応のために1分程度の順応時間を設定した。

第4項 実験手続き

実験参加者は、高さを調整できる実験用椅子に着席し、実験者から実験説明を受けた後、同意を求められた。石津(2011)の利き目の決定方法を用いて、単眼および両眼視の機能が調べられた。すなわち片手の拇指と示指で輪を作り、その隙間から両眼で遠景を凝視した後、今度は単眼で凝視した時、左右のどちらの眼で遠景をとらえたかが問われた。次に実験参加者の姿勢は、先行研究(Künnapas, 1955a; Wolfe et al., 2005)と同様に、chin-restを用いることなく以下のように調整された(cf. Marma et al., 2015)。(1)足が届き、実験参加者の視軸が水平に保たれ、安楽が維持できるように椅子の高さと背もたれの角度が調節された。(2)実験参加者の視軸とPC画面の中心(上の二本線の接点)が水平に維持されるよう椅子の高さが調整された。(3)眼球表面からモニター画面までの距離が500 mmになるよう椅子の前後距離を調整された。最後に(4)注視点が底線の中点に維持されるよう椅子の左右方向が調整された。なお、単眼実験では左または右眼だけが覆われたメガネをかけて同様の調整が行われた。なお姿勢調整後は、実験中背もたれから背中を離したり座

り直しをしたりしないよう教示した。

実験開始前には練習試行が行われ、暗い実験室においても、実験参加者がコントローラの操作ができることを確認した。実験課題は、底線 (50 mm) に対して帆線を同じ長さに調整することだった。実験参加者は開始ボタンによって、表示された底線と帆線の長さが等しくなるようジョイスティックを操作した。そして、底線と帆線の長さが等しいと判断した場合、終了ボタンを押し一試行を終えた。

第5項 実験計画

物理的要因として接点位置 (7 条件) および向き (4 条件) の二要因を実験変数とした。接点位置は、底線 (50 mm) の中点を 0 と定義し、(左端点から -3 (-25 mm), -2 (-16.6 mm), -1 (-8.3 mm), 0 (0 mm), $+1$ ($+8.3$ mm), $+2$ ($+16.6$ mm), $+3$ ($+25$ mm) の 7 水準で表した。向きについては、基本図形を基準 (\perp) に用い、底線を基準線として帆線を上向きに伸ばす場合を「Up」条件、基本図形を 180 度回転 (π) して帆線を下向きに伸ばす「Down」条件、右方向に 90 度回転させて (\vdash)、帆線を右向きに伸ばす「Right」条件、反対に左方向に 90 度回転させて (\dashv)、帆線を左向きに伸ばす「Left」条件とした。

さらに、これら二つの物理的要因に対して、単眼視と両眼視の影響を検討した。単眼視と両眼視間の影響をみる場合は、左単眼視の結果と右単眼視の結果を平均した値を単眼視の代表値として扱い、両眼視の結果と比較した。

各条件について 2 試行ずつ実施した。実験は、向き条件に従い 4 ブロックに分け、接点条件を含めると、1 ブロック 14 試行 (7 接点位置 \times 2 試行) となり、接点位置 \times 向き位置だけで 56 試行 (14 試行 \times 4 向き) となる。さらにこの試行を 3 つの視覚条件 (左単眼・右単眼・両眼) で実施したため、総試行数は 168 試行 (56 試行 \times 3) となった。なお視覚条件、向き条件については実験参加者間でカウンターバランスをとり、接点位置は疑似ランダムに提示された。また、提示される帆線の初期値は、同じ条件において、1 試行は底線よりも任意に短く、もう 1 試行は長くなるよう系列効果を相殺した。

1 試行は、10 秒から 10 数秒程度と短時間であるが、暗室での単調な繰り返し実験であるため、眼精および精神疲労等を配慮し、1 日の実験時間は休憩時間を含め 60 分以内 (80 ~ 100 試行) とし、一人について二日間に渡って実施した。

第6項 錯視量の定義

実験により PC に記録された PSE (mm)を用いて、底線 (100%)を基準として、底線よりも短く知覚した場合の錯視量 (錯視の強さ)を $PSE < 100\%$ とし、逆に長く知覚した場合の錯視量を $PSE > 100\%$ と示した。例えば、錯視量が 120%であれば、底線よりも 20%長く知覚したことを表し、錯視量が 85%であれば底線よりも 15%短く知覚したことを表している。

第7項 分析方法

Excel 処理されたデータを IBM SPSS Statistics 22 (Windows 7)によって記述統計および統計処理を行った。各条件、2 試行の平均値を代表値とし、各実験参加者のデータを条件ごとに PSE および錯視量をまとめた。第1節で設定した仮説1 (接点位置の影響)、仮説2 (向きの影響)、仮説3 (単眼・両眼の影響)では、実験参加者の錯視量に対して三要因すべてに対応のある三要因分散分析 (7 接点位置 \times 4 向き \times 2 単眼・両眼)を実施した。統計の有意水準は 5% ($p < .05$)とした (竹原, 2010)。

第3節 結果

Table 3 (p.52)は、VHI の向き、単眼・両眼視の各条件における接点位置に対する錯視量 (%)の平均値および標準偏差をそれぞれ示している。左側の列から、向き、単眼・両眼視、および左端から右端にかけての接点位置を示し、上側の行から、向きの4条件 (Up, Down, Right, Left)を示している。なお単眼視の結果は、各実験参加者の左右単眼の結果を平均した。

三要因分散分析 (7 接点位置 \times 4 向き \times 2 単眼・両眼)の結果からは、接点位置 ($F(3.53, 120.17) = 22.06, p < .001, \eta p^2 = .39$)および向き ($F(2.00, 67.82) = 42.36, p < .001, \eta p^2 = .56$)にそれぞれ有意な主効果が見られた。しかし、単眼・両眼視には有意な主効果は認められなかった ($F(1, 34) = .01, n.s., \eta p^2 = .00$)。交互作用効果については、接点位置 \times 向き ($F(8.92, 303.33) = 1.69, n.s., \eta p^2 = .05$)、接点位置 \times 単眼・両眼視 ($F(6, 204) = .37, n.s., \eta p^2 = .01$)、向き \times 単眼・両眼視 ($F(3, 102) = 1.64, n.s., \eta p^2 = .05$)のいずれの二要因間にも

も有意差は認められなかった。また、接点位置×向き×単眼・両眼視の三要因についても交互作用効果は有意ではなかった ($F(10.78, 366.59) = .82, n.s., \eta p^2 = .02$)。

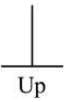

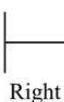

Figure 7 (p.52)は、基本図形「⊥」(Up 条件)の単眼視 (Monocular 条件)の PSE の結果について底線を 100%としたとき帆線の割合を示している。接点位置の主効果は有意であり、多重比較 (Bonferroni 法)からは接点位置「0 (中点)」と、「-2」, 「-1」, 「+1」, 「+2」のそれぞれの間に、また接点位置「-3 (左端点)」とは、「-2」, 「-1」, 「+2」のそれぞれとの間に有意な差が認められた ($p < .05$)。

Figure 8 (p.53)は、各向き条件でのそれぞれ単眼視の PSE の結果について底線を 100%としたとき帆線の割合を示している。図中の下から「⊥ (Up)」条件 (●), 「⊥ (Down)」条件 (○), 「⊥ (Right)」条件 (■), 「⊥ (Left)」条件 (□)の結果である。いずれの向き条件でも、基本図形と同様に接点位置に対して錯視量はおおむね M 字型に推移した。向きの主効果は有意であり、多重比較 (Bonferroni 法)の結果からは、すべての接点位置において Up vs. Right, Up vs. Left, Down vs. Right, Down vs. Left の条件間で有意な差異が認められた ($p < .05$)。なお、接点位置「+3」では、さらに Right vs. Left の条件間にも有意な差が認められた ($p < .05$)。

以上をまとめると、底線を基準にしたとき (Up および Down 条件)と、底線を 90° もしくは 270° 向きを変えたとき (Right および Left 条件)では、接点位置の影響は変わらず M 字型であるが、錯視の強さは明らかに異なっていた。さらに、M 字型のプロフィールを詳細にみると、そのプロフィールは、底線の中点を起点として左右に差があり、グラフ上では「右肩あがり」つまり右側の方が左側に比べて帆線を長く知覚する ($PSE > 100\%$) 傾向を示した。そしてこの現象は図形を回転した場合でもほぼ一貫して見られた。また、同一図形例えば「⊥」の場合、底線を水平線とした時の帆線は短く ($PSE = 97\%$)、底線を垂直線とした時の帆線は長く ($PSE = 107\%$)知覚され、他の図形も同様な結果となった。

Figure 9 (p.53)は、「⊥」: Up 条件での両眼視および単眼視の PSE の結果について底線を 100%としたとき帆線の割合を示している。横軸には接点位置、縦軸には PSE (%)を示している。分散分析の結果から、各向きおよび接点位置で得られた錯視量については、単眼・両眼視で有意な差異は認められなかった。したがって、単眼で評価しても、両眼で評価しても VHI の錯視量には影響がなく、接点位置に応じて M 字型を呈した。

Table 3 接点位置と向き, 単眼・両眼視による錯視量 (%)の平均値および標準偏差 (小原・川合, 2020a)

Orientation	Vision		Contact position						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
	Monocular	mean	97.23	101.02	100.63	94.46	100.54	102.34	99.48
		S.D.	7.24	7.39	8.10	7.77	8.51	7.77	6.20
	Binocular	mean	97.10	101.74	101.33	94.62	99.45	101.52	98.85
		S.D.	9.02	9.87	9.10	9.91	8.08	8.84	6.88
	Monocular	mean	96.02	99.73	98.87	94.26	98.73	101.67	99.30
		S.D.	9.00	7.50	8.12	7.66	7.01	7.99	7.68
	Binocular	mean	96.67	99.66	99.86	95.90	102.25	103.23	100.13
		S.D.	9.21	7.21	7.43	10.43	8.57	8.36	8.96
	Monocular	mean	106.68	110.52	110.50	105.00	109.55	111.85	107.10
		S.D.	6.01	8.41	8.04	8.85	9.73	8.08	6.40
	Binocular	mean	104.84	109.48	110.11	106.05	109.12	110.96	106.25
		S.D.	5.29	9.26	10.78	10.54	9.41	9.59	4.99
	Monocular	mean	104.67	107.92	107.22	104.64	109.06	109.18	104.36
		S.D.	4.89	7.29	9.17	9.56	7.94	8.26	5.43
	Binocular	mean	104.03	107.98	108.03	102.56	107.99	108.19	103.93
		S.D.	6.29	8.21	9.11	8.29	8.56	9.65	6.76

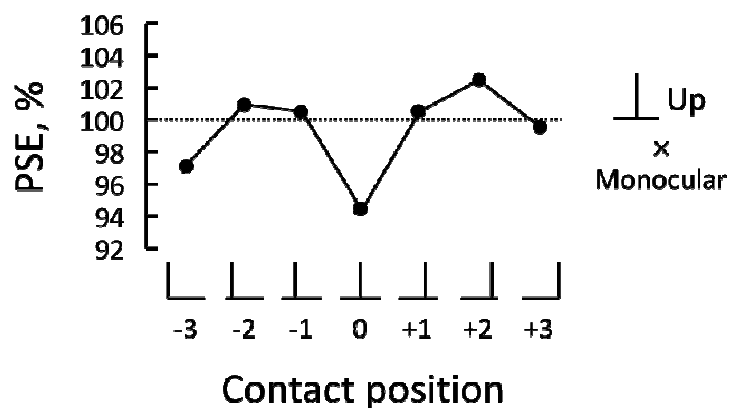


Figure 7 接点位置に対する錯視量曲線

単眼視における Up (⊥)条件のデータである。帆線の調整によって得られた錯視量 (PSE)は、基準となる底線 (50 mm)に対するパーセンテージで示されている。従って、点線上の PSE は基準線と等しくなるため、錯視が起こっていないことを示す。点線の上では底線より長く知覚した場合の錯視 (PSE > 100%)が起こり、点線の下では底線よりも短く知覚した錯視 (PSE < 100%)が起こる。日本基礎心理学会より使用許可を得て小原・川合 (2020a)から抜粋した。

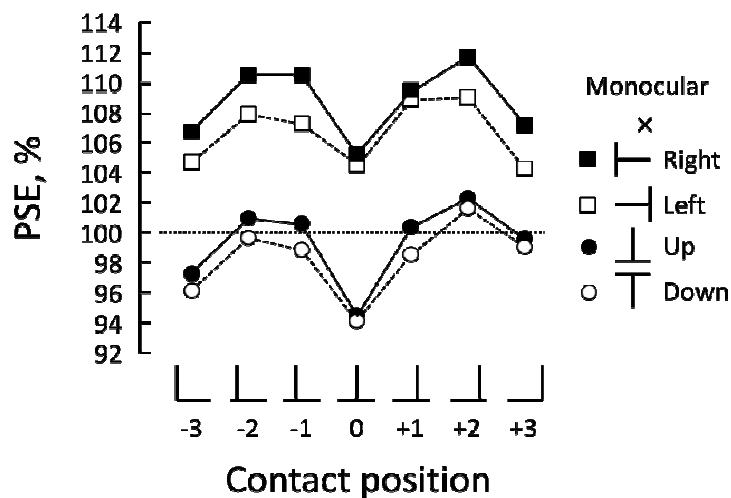


Figure 8 向きに対する錯視量曲線

単眼視で Up (●)と Down (○), Right (■), Left (□)の各条件で得られたデータである。錯視量の大きさは底線が水平になった場合の Up および Down 条件よりも、底線が垂直になった場合の Right および Left 条件の方が、帆線が底線よりも長く知覚された。日本基礎心理学会より使用許可を得て小原・川合 (2020a)から抜粋した。

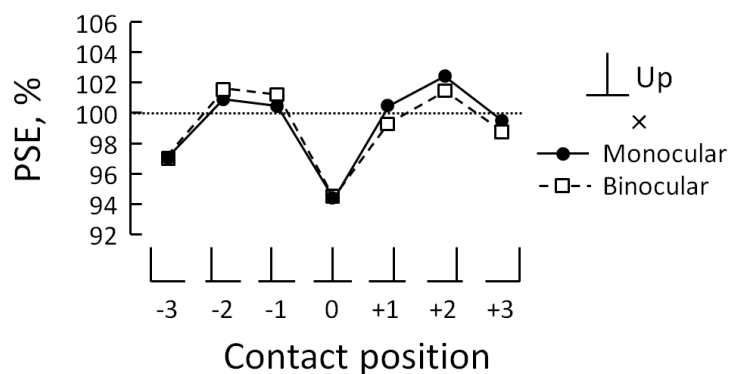


Figure 9 単眼視と両眼視に対する錯視量曲線

Up (⊥)条件を基準として単眼視条件 (●)と両眼視条件 (□)を示したグラフである。それぞれの結果から、単眼視条件と両眼視条件の間には有意な差は認められなかった。日本基礎心理学会より使用許可を得て小原・川合 (2020a)から抜粋した。

第4節 考察

Fick (1851)以降、垂直・水平錯視 (VHI)の生起に関わる要因に関する報告が多くなされてきたが、その知見の多くには、対立する知見や再現性の確認が必要なものが存在していた。そのような要因の中から物理的要因として水平線分と垂直線分の接点位置および図形の向きの二要因を精査するとともに、単眼・両眼視といった観察者要因の影響について検討した。

第1項 接点位置の影響

二線の接点位置が錯視に及ぼす影響において、中点 (⊥や⌒)や端点 (└┐)での影響については数多く検証されている。しかし、中点から端点にかけて連続的、組織的に検討したものは数少ない。しかも、調べることでできた結果は対立していた (Künnapas, 1955a; Wolfe et al., 2005; Marma et al., 2015)。すなわち中点を底とした単純な「V字型」 (Figure 5-A; p.43; Künnapas, 1955a)、やや丸みを帯びた「V字型」 (Figure 5-B; p.43; Wolfe et al., 2005)、中点を底とすることは他の結果と同様であるが、中点と端点の間の錯視量は帆線が長くなる方向で増加する「M字型」 (Figure 5-C; p.43; Marma et al., 2015)である。

本研究では、このような対立は刺激図形の背景や枠組みの影響によるものではないかと考えた (Künnapas, 1957a; Mankin, 1969; Houck et al., 1972; von Collani, 1985a)。実際に Prinzmetal & Gettleman (1993)および Marma et al. (2015)は、背景や枠組み要因を最小限にするため実験を暗室で行ったのに対して、Künnapas (1955a)は白い四角の刺激図形に図形を描き、照明を当てて観察者に提示していた。このことから本研究では Prinzmetal & Gettleman (1993)、Marma et al. (2015)の方法と得られた結果から仮説1を設定した。結果は、VHIの現れ方は接点位置によって変化しM字型に錯視量が変化するプロフィールを呈した (Table 3, Figure 7; p.52)。すなわち中点のPSEが最小となり、錯視が最も強く生じた。次に左右の端点のPSEは中点よりも影響は少なかった。そして、注目の中点と端点間での錯視量の変化については、仮説1のとおり Marma et al. (2015)と類似したM字型を呈した (Figure 7, 8, 9; pp.52-53)。

それではなぜM字型になるのかについては、Howe & Purves (2002)が興味深い環境データを示した (Figure 10; p.55)。彼らは、身長の高さ (165 cm)に設置した広角 (水平

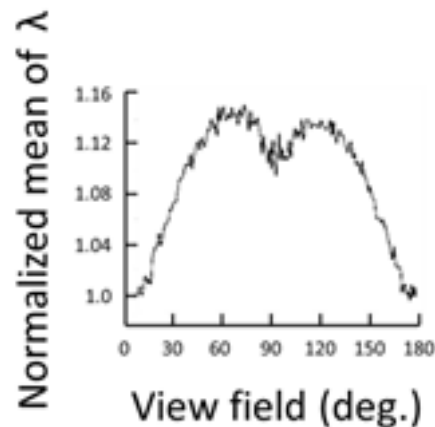


Figure 10 錯視量曲線の「M字型」変動の例 (Howe & Purves, 2002, p. 13186, Figure 3-C)

横軸は視野角を示す。縦軸は直交/極座標比 (λ)を示す。日本基礎心理学会より使用許可を得て小原・川合 (2020a)から抜粋した。

333° (垂直 80°) のレーザーを通して自然風景 (15,000 イメージ) をスキャンし、ピクセルごとに直交軸の三次元空間座標を網膜上のように二次元の極座標系に変換し、外界座標系と網膜座標系が対比できるデータベースを作った。そしてそのデータベースから任意の 2 点をランダムに抽出 (25,000 万 <) し、2 点間の直線の長さの実測値および網膜上での長さに対する比を算出し、視軸を中心として角度 (5° step) ごとにその平均値を算出したところ両者の比は M 字型を示した。このようにランダムで抽出したときに、比の平均値が角度によって波うつのは、抽出される物理的資源の質 (2 点間の実際の長さ) と量 (その遭遇確率) に依存するからである。つまり、網膜上には同じ長さに映る線分でも、実世界で経験する本当の長さはその資源が飛び込んでくる角度によって異なっており M 字型はその重みづけといえる。この環境に規定された重みづけが感受性あるいは文脈効果となり、逆にそれを活用することによって、二次元に落とされた情報から実世界の三次元空間をより正確に認識ができ、かつ環境への働きかけができるというのである。このように考えると錯視は三次元世界での実際の長さを推測した結果ととらえることができる。

これまで VHI の発生機序については、眼球の運動情報が VHI を生じるという「眼球運動」説 (Wundt, 1897; Luckiesh, 1922), 直交する垂直方向と水平方向へのスケール (縮尺) が異なっているために生じるとする「異方性 (非対称性)」説 (Künnapas, 1957b; Pearce & Matin, 1969; Restle & Merryman, 1969; Prinzmetal & Gettleman, 1993), 水平線に立つ垂直線が水平線を分割することによって生じるとする「分割」説 (Oppel, 1855;

Künnapas, 1955a; Girgus & Coren, 1975; Wolfe et al., 2005; Charras & Lupianez, 2009, 2010), 消失点に向かう斜線によって生じる奥行処理によって生じるとする「線遠近法」説 (Woodworth, 1938), さらにその奥行処理が大きさの恒常性を引き起こした結果とする「大きさ恒常性の誤作動」説 (Gregory, 1963, 1973, 1997), またそれに類似した説 (Leibowitz, 1965; Day, 1972; Schiffman & Thompson, 1975; von Collani, 1985a,b; 川合, 2010)がある。さらに, 奥行手がかりと枠組み (Williams & Enns, 1996), 対称性と遠近法 (Wolfe et al., 2005), 異方性と二分割 (Hamburger & Hansen, 2010; Mamassian & de Montalembert, 2010; Mikellidou & Thompson, 2013)などを複数の理論を組み合わせた説も提案されている。近年ではベイズ決定理論などを取り入れた確率モデルで, 上述した先行的な優先性を組み込んだ解釈がある (Craven, 1993; Mamassian & Landy, 2001; Howe & Purves, 2002; Wolfe et al., 2005)。

本研究では, 二本の線分を直交させた VHI においても, 他の錯視図形を用いた線遠近法的実験と同様に M 字型変化が見られたことから, これまでの VHI に特化した解釈から視空間認識におけるより基本的・包括的な処理機構の関与の可能性が高まったと考えている。その意味では, 垂直線分が視軸から少しでも逸れると垂直線においても, 先行する線遠近的バイアスが影響するという Wolfe et al. (2005)の主張や, Howe & Purves (2002)の M 字型に変化する長さに対する感受性が, 網膜像へ飛び込む実世界資源の確率分布に基づいて決定されるという Top-down 的处理の主張は魅力的であり, VHI の発現要因にも適用できる可能性が広がったと考えている。

結論として, VHI は中点での影響が最も強く, 両端点での影響は弱いほとんど消失した。この結果は先行研究と一致した (Künnapas, 1955a; Wolfe et al., 2005; Marma et al., 2015)。一方, 中点と端点間での錯視量の変化については, V 字型 (Künnapas, 1955a; Wolfe et al., 2005)や M 字型 (Marma et al., 2015)と結果が対立していた。しかし, Marma et al. (2015)の実験方法に従い, 背景要因等を最小限にした環境では, 底線より帆線の長さが長く知覚される「M 字型」となり, 仮説 1 は支持された。また本研究結果は, Marma et al. (2015)の結果 (Figure 5-C; p.43)よりも明確な変化として現れた。

しかし, 本研究では, 背景や枠組みの要因を統制しただけであり, 他の要因の関与も依然残っている。例えば, 本研究で見られた, M 字型の非対称性である。すなわち, 逆 T 字図形を基本とした場合, M 字型に現れる錯視量変化は中点を境に, 右肩上がりを示した点である。先行研究結果 (Figure 5; p.43)に立ち帰ってみると, 対称性 (Künnapas, 1955a),

右肩あがりの非対称性 (Wolfe et al., 2005), 若干右肩さがりの非対称性 (Marma et al., 2015)と三者三様の結果であった。また, いずれの報告についても左右の対称性に関する言及は見られない。この理由について, その原因は解釈できないが, 結果の不一致は, 測定法の問題が考えられる。

第2項 向きの影響

VHI の現れ方が接点位置に依存して「M 字型」になるという特性は, 図形をどの向きに回転させても同様であり, 仮説どおり Marma et al. (2015)の知見を支持した (Figure 5-C; p.43, Figure 8; p.53)。しかし錯視の生じる方向, すなわち底線よりも長くみえる方向に錯視が生じるか, 反対に底線よりも短く見える方向に錯視が生じるかは有意に向きの影響を受けた。つまり「 $\perp \cdot \tau$ 」のように底線を水平位に保ち, 帆線を垂直方向に伸縮させたとき (Up/Down 条件)に比べて, 「 $\vdash \cdot \dashv$ 」のように底線を垂直位に保ち, 帆線を水平方向に伸縮させたとき (Right/Left 条件)の方が, 錯視は帆線が底線より「短い」から「長い」方向に有意に作用した (Figure 8; p.53)。この結果は仮説どおり Künnapas (1955a)の知見と一致した (Figure 5-A; p.43)。なお, Künnapas (1955a)は, 統計的な有意性について言及していなかったため, 本研究で初めて向きの要因を一般化したといえる。

水平線分の長さに垂直線分の長さを合わせると, 垂直線分は水平線分よりも「短く」しないと等しく知覚できず, 逆に垂直線分の長さに水平線分の長さを合わせると, 水平線分は垂直線分よりも「長く」しないと等しく知覚できなかった。この文脈からは我々の視知覚処理では, 縦軸と横軸の比率が異なって処理されていることが推測される。基本図形の中点における錯視量 (Table 3; p.52)を例にとると, 50 mm の水平線を標準刺激にした時 (Up/Down 条件)には, 垂直線分の PSE は 94.26 ~ 94.43 %で帆線は底線より短くなり 47.23 ~ 47.13 (平均 47.18) mm となる。一方, 50 mm の垂直線を標準刺激にした時 (Right/Left 条件)には, 水平線分の PSE は 104.64 ~ 105.00%で帆線は底線より長くなり 50.25 ~ 50.23 (平均 50.24) mm となる。このことから, 縦横比すなわち縦 (47.18 mm)に対する横 (50.24 mm)は 106.5%と推測される。この結果は, Finger & Spelt (92.8%, 1947), Hamburger et al. (93.4%, 2007), Hamburger & Hansen (93.54%, 2010)および Mamassian & de Montalembert (94.0%, 2010)と一致し, Künnapas (86.98%, 1955a)や Gardner & Long (71.7%, 1960)とは異なった。

このように、我々が外界を投影している視空間座標の縦横比に「垂直バイアス」あるいは「異方性 (anisotropy)」が存在することについては、Fick (1851)が既に VHI 図形を「視空間の非対称性の例」として扱っていたことから領け、VHI の発現の原因の一つとして多くの研究者が支持している。ただし異方性の背景については、眼球角膜での屈折特性 (Valentine, 1912b; Avery & Day, 1969; Thompson & Schiffman, 1974)、網膜上の光受容体 (Begelman & Steinfeld, 1971)や色素 (Bayer & Pressey, 1972)の分布特性、視野が横長に扁平した楕円説 (Künnapas, 1955b, 1957a, b; Prinzmetal & Gettleman, 1993) など解剖学的な解釈から、環境生態学的解釈 (Craven, 1993; Howe & Purves, 2002)まで多岐に渡る。

結論として、刺激図形を回転させ向きを変化させることにより垂直-水平の両軸における「異方性」の存在を確認することができ、Künnapas (1955a)の結果 (縦軸 < 横軸)と一致し仮説 2 は支持された。この異方性については、本研究結果および先行研究から物理世界の縦横比が 1 : 1 であるのに対して、知覚処理世界の縦横比は 1 : 1.06 程度ではないかと提案する (Finger & Spelt, 1947; Hamburger et al., 2007; Hamburger & Hansen, 2010; Mamassian & de Mountalembert, 2010)。しかしながら、今回の実験結果で明らかになった課題は、図形の向きにより同じ図形でも異なった錯視量になるが、その値の差が大きい点についてである。錯視は、水平線より垂直線が長く見える (Fick, 1851)ように起こる。このため、同じ長さでも底線が水平線で帆線が垂直線の場合、帆線は短めの長さを知覚する錯視 (PSE < 100%)が起こる。また、底線が垂直線で帆線が水平線の場合、帆線は長めの長さを知覚する錯視 (PSE > 100%)が起こる。実験結果の Figure 8 (p.53)を見ると Right 条件 (┐)と Left 条件 (┌)の錯視量は Up 条件 (⊥)と Down 条件 (⊢)より上にきており、これは Künnapas の結果 (Figure 5-A; p.43)である V 字型でも明らかである。しかし、同じ図形 (例えば L 字)で差が大きく出ている。これについては、先行研究にも知見がなく不明であり、また今回の結果からだけでは言及することもできない。そのことからこれが事実なのかどうか、または別に原因があるかどうかを解明する必要がある、それは今後の研究課題としたい。

第 3 項 単眼および両眼視の影響

VHI の錯視量への単眼・両眼視の影響については、先行研究の結果は錯綜していた。つ

まり Künnapas (1957c)は単眼視・両眼視には錯視量に差異を認められなかった（左 3.8%, 右 4.2%, 両眼 4.0%）とし, Harrington (1981)は単眼視の方が両眼視よりも強かった（24%）と報告した。

本研究結果からは、接点位置および向きという物理的要因変化に伴う錯視量変化に対して、単眼視および両眼視の影響は認められず Künnapas (1957c)の結果と一致した（Table 3, Figure 9; pp.52-53）。

結論として、実験参加者が両眼で錯視図形を観察しても、また単眼を用いて観察しても、さらにそれを回転させても、錯視の現れ方は一様に M 字型のプロフィールを呈した。このことは、VHI 図形は単眼視レベルで結像処理される一方で、輻輳や立体視などによって影響を受けるものではないという Julesz (1971)の主張を支持した。

第 4 項 今後の展開：発生機序解明に向けて

本研究では、VHI に影響をおよぼす背景要因を排除するため、Marma et al. (2015)と同様に、暗室を用いて刺激線分のみを浮かび上がらせる方法を採用した。しかし、実験室を暗室にしたことによる直接的な影響の有無については、要因が増え実験参加者の負担が増大するため本研究では実験に組み込まなかった。「明暗」が見えの長さに影響するかどうかは先行研究が乏しく、新たに詳細な検討の必要性がある。

また本研究において新たな課題が見出された。M 字型の左右に見られる非対称性と同一図形でも回転させると錯視量は異なり、かつその量の差が大きいことである。これらに関して、本研究は言及することは困難である。それは本研究が底線を基準に帆線を調整する量的研究であり、実験結果は実際の錯視量の変化を示しているからである。しかしながら、錯視は人間の感覚反応によることから、今後は仮説を設定し、評定尺度法やマグニチュード推定法などの質的研究に関しても検討する必要がある。

Fick (1851)は、「暗い背景上の明るい正方形は垂直方向に長くみえる」と示唆しており、同一条件において照度を変化させても、M 字型の変動性が見られるのか、あるいは V 字型の変動性が浮上するのかは極めて興味深い。VHI がなぜ生じているかを議論するのは尚早であるが、もし明暗が錯視に関与するとすれば視細胞のレベルでの解釈も必要となるだろう（松田, 1995）。

第3章 明所視，薄明視および暗所視が錯視量変化に及ぼす影響

第1節 VHI と明暗の関連

VHI とは、物理的に同じ長さの垂直線分と水平線分を逆 T 字型「⊥」あるいは L 字型「┐」に接して観察した際に、水平線に比べて垂直線が長く見える錯視現象をいう (Fick, 1851; Oppel, 1855; 大山, 2005; 北岡, 2005, 2010)。Fick (1851)により初めて紹介されたことから「Fick illusion」とも呼ばれる。Fick の報告以降、錯視に関与する物理的要因 (垂直線と水平線の接点位置、刺激を提示する背景、提示時間、実験室の明暗など)や観察者要因 (単眼視、両眼視、姿勢、性差など)について多くの研究がなされ、多くの知見が報告されてきた。

また近年になっても認知科学の観点から、外界情報の 80%を依存している視覚の処理機構 (Zimmermann, 1976)を、VHI を用いて解明しようとする研究者も少なくない (Ro & Rafal, 1996; Howe & Purves, 2002 ; Wolfe, Maloney, & Tam, 2005; Yacoub, Harel, & Ugurbil, 2008; de Montalembert & Mamassian, 2010)。このように、VHI 研究には長い歴史と新たな方向性が見えてはきたものの先行研究の結果は多様であり、十分に検証されているとは言い難い。一例を挙げると基準線 (以後、底線)と垂直線 (以後、帆線)を変化させただけでも結果は分かれている。Künnapas (1955a)は錯視は水平線の中点で最も強く、左右の端点に行くほど徐々に弱まるという「V 字型」の錯視量変化を提案しているが、Marma, Bulatov, & Bulatova (2015)は「M 字型」、すなわち中点で最も強く、左右両端でやや影響を受け、中点と端点の間では逆の方向に影響を受けると報告した。このような結果の差異は、これら二つの研究が、明所視 (Künnapas, 1955a)と暗所視 (Marma et al., 2015)という実験環境の違いで生じた可能性がある。

一方、VHI への明暗の影響に関する先行研究の中には、Fick (1851) 自身「暗い背景上の明るい正方形は垂直方向に長く見える」との指摘が見られる。Ritter (1917) は外光を遮断しライトの数 (8個 vs. 7個)を変化させ L 字型および逆 L 字型に対する錯視量を測定し、錯視量に差異がないことを報告した。Künnapas (1957b)は、L 字型図形を用いて明所視 (150W のライト)と暗所視 (ライトの消灯)での錯視量を測定し、明所視 (92.9%)の方が、暗所視 (95.2%)に比べて有意に錯視が強くなることを報告した。Avery & Day (1969)は、

直線の光束を 0.15 ml とし実験室のカーテンや扉の開閉により L 字型図形に対する錯視量を測定したが、暗所視 (97.4%)、薄暗がり (95.6%)、明所視 (94.1%)と、明るさに応じて錯視が強くなる傾向が見られたが有意な差異は認められなかった。

Prinzmetal & Gettleman (1993)は、フィルター付メガネで暗所視 (背景輝度: 0.01 cd/m²; 線の輝度: 0.24 cd/m²)と明所視 (背景輝度: 11.4 cd/m²; 線の輝度: 35.5 cd/m²)をつくり、L 字型図形での錯視量を測定し、明所視 (96.9%)の方が暗所視 (98.3%)よりも錯視が強くなることを示した。しかし彼らは統計的な比較は行っていなかった。江草・御領 (1998)も、明るさを 13 段階 (1.20 ~ 2.40 cd/m²)に分け、逆 T 字型の錯視量を測定しているが、実験参加者数が少なく (n = 4)、個人差も大きく有意な差異は認められなかった。このように先行研究は対立している。

以上をまとめると、VHI の錯視量の変化は、明暗の影響および図形の帆線と底線の接点位置の影響を受けることは確かなようであるが、その動態は依然として不明瞭である。先行研究から概観すると、明るい時の方が暗い時に比べて錯視が強くなるという傾向はありそうであるが、刺激として用いられる VHI 図形によって、すなわち帆線と底線の接点位置による錯視量変化についてはまだ不鮮明であり、さらに明暗を操作した中での影響についてはまだ報告は見られない。

そこで本研究では、5 種類の VHI 図形を用い、明暗が VHI の錯視量に及ぼす影響を検討することにした。なお明暗の定義は松田 (1995)に従い、暗所視 (scotopic vision)とは「わずかな星明かりで白紙がぼんやり視認ができる」 (< 1.0 lx)、薄明視 (mesopic vision)とは「黄昏時の物の色と形がいくらか視認できる」 (1.0 ~ 10 lx)、明所視 (photopic vision)とは「物の色と形がはっきりと視認できる」 (10 lx <)として取り扱った。仮説 1 として、VHI の錯視量は明暗の影響を受け、明るい方が暗い方よりも強くなるとした (Künnapas, 1957b)。仮説 2 として、接点位置に対する錯視量変化は、先行研究にならい横軸を接点位置とし、縦軸を錯視量と設定したときに明所視では V 字型 (Künnapas, 1955)、そして暗くなるにつれて M 字型 (Marma et al., 2015)に変化するとした。

第2節 方法

第1項 実験参加者

健康な 28 名の実験参加者（男性 15 名，女性 13 名；平均年齢 20.6 ± 1.97 歳）が同意の上実験に参加した。実験参加者のすべてが課題遂行に支障を与えるような知覚運動機能および視覚機能はなかった。なお日常生活において眼鏡やコンタクトを着用している実験参加者はそれらを着用して課題を行った。なお，本実験は帝塚山大学研究倫理委員会の承認(29-03)を経て，実験参加者に対して倫理的配慮の下に実施した。

第2項 実験環境

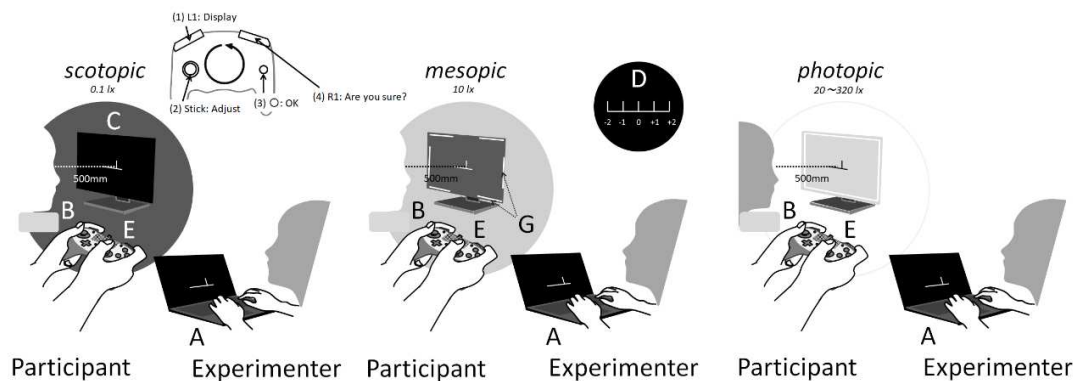


Figure 11 実験の模式図

実験室の光が遮断され (< 1.0 lx), 実験者の PC (A)ですべて制御された。刺激図形は chin-rest (B)に顎を載せた実験参加者から 500 mm の距離にある monitor (C)に表示された。底線 (50 mm)上の 5 つの接点位置 (D)のいずれかの点から任意の長さの帆線が表示された。実験参加者はゲームコントローラ (E)のボタンとジョイスティックを操作 (F)して、底線と同じ長さになるように帆線の長さを調整した。Monitor (C)と棒状の LED (G)の光量を調節して、暗所視 (scotopic: < 1.0 lx), 薄明視 (mesopic: 10 lx), 明所視 (photopic: 20 ~ 230 lx)の 3 条件を設定した。照度は目の直前で計測した。小原・川合(2020b)から抜粋した。

VHI 図形

Figure 11 (p.62)に実験の概略図を示した。実験刺激 (VHI)の提示, 操作およびデータの記録は PC (Windows 7)上で行った (Figure 11-A; p.62)。Visual Studio 2012 (Microsoft 社製)を用いて, 以下のように刺激提示, 帆線の変化量, 各試行の記録ができるプログラムを作成した。

刺激は, 実験参加者の前に, 机面に対して垂直に設置されたフルフラットな PC 画面 (Figure 11-B; p.62; (株)日本 HP 製, 20 inch TFT フラットパネルモニタ, HP LP2065, Japan)上に提示された。底線の長さは 50 mm (172 pixel), 幅 3 mm (10 pixel)で PC 画面の中央に水平位にされた。一方, 実験参加者が長さを調整する帆となる帆線 (幅 3 mm)は, 底線を 5 等分し (Figure 11-D; p.62), 5 つの開始点のいずれかが提示され, その点から垂直方向に線分が伸縮できるようにした。底線と同時に提示される帆線の長さの初期値は, 底線よりも任意に短い線分 (上昇系列)あるいは長い線分 (下降系列)を提示し系列効果を相殺した。また, 線分の色は照度条件によって, 白色 (#FFFFFF; 暗所視・薄明視)と黒色 (#000000; 明所視)が用いられた。

帆線の長さの調整は, ゲームコントローラ (Figure 11-E; p.62; (株)ホリ製, HORIPAD FPS PLUS, Japan)を用いて実験参加者自らが容易に調整できるようにした。操作に不慣れな実験参加者も容易に理解し, また暗室でも容易に操作できるよう 3 操作で一試行が完結できるようにした (Figure 11-F; p.62)。すなわち, ① [ジョイスティック (左)] に触れると図形表示と長さの調整開始, ② [右○ボタン]で調整終了, ③[R1 ボタン]で確定, 試行終了の 3 操作だった。[R1 ボタン]の設定は, 実験参加者が確認, 再調整できるという意味だけでなく, 指先からの能動触覚ではなく (Heller, Calcaterra, Burson, & Green, 1997), 視覚からのフィードバックに最終的に依存するという意味で重要だった。試行から得られた実験参加者の PSE データは, 自動的に条件や実験参加者の情報とともに記録され, その後の分析に用いられた。ジョイスティックの移動方向と帆線の伸縮方向は一致させ 3 pixel/秒で描画させた。帆線は 5 pixel (1.45 mm)ごとに動かすことができた。なお, 実験参加者の操作はすべて実験者用 PC 画面 (Figure 11-A; p.62)に表示させ, 実験者が確認することができた。

要因の操作

照度 (7 条件)および接点位置 (5 条件)の二要因を実験変数とした。照度の統制のため、実験にはアビテックス防音室を使用し、部屋に入る光はすべて遮断した。次に、PC 画面由来の光源 (0, 10, 20, 40 lx)と PC のフレームに装着した LED (Figure 11-G; p.62; 白色)の光源 (0, 40, 120, 280 lx)を組み合わせ、暗所視 1 条件 (< 1.0 lx), 薄明視 1 条件 (10 lx), 明所視 5 条件 (20, 40, 80, 160, 320 lx)の計 7 条件 (Figure 12)の照度条件を設定した。なお照度は、Monitor の中心から 500 mm 離れた実験参加者の眼前にデジタル照度計 (株メーター名人, LX1010B: 1 ~ 50000 lx)を設置して照度を決定した。この照度条件を実験中終始維持するため、衝撃緩衝マットを敷いた chin-rest を用い、実験参加者に顎を載せるよう求めた。これにより、実験中の視軸の水平位と画面との距離の維持に努め、照度条件を維持した (Figure 11-B; p.62)。照度条件は各実験参加者に対して疑似ランダムに配置した。次に接点位置の統制は、基本図形 (⊥)の底となる底線 (50 mm)の左端点から -2 (-25 mm), -1 (-12.5 mm), 中点を 0, +1 (+12.5 mm), +2 (+25 mm)の 5 水準で表した (Figure 11-D; p.62)。なお照度条件ごとに、5 か所について疑似ランダムに与えられた。各照度および各接点位置に対して、上昇系列と下降系列について 3 試行ずつ与えられたの

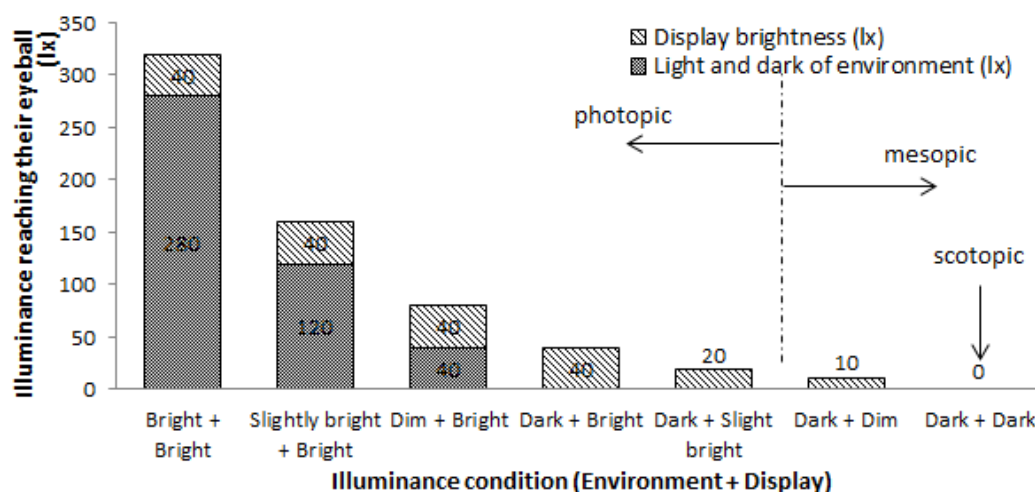


Figure 12 照度条件

照度条件は暗所視・薄明視・明所視が含まれる範囲とし、画面の明るさと (0 ~ 40 lx)と LED ライトの明るさ (0 ~ 280 lx)を組み合わせ全範囲を網羅できる条件とした。小原・川合 (2020b)から抜粋した。

で、各条件は計 6 試行となった。結果、実験参加者の総試行数は 210 ($7 \times 5 \times 6$) 試行となった。

第 3 項 実験手続き

実験参加者は、実験についての説明を受けた後、実験参加の同意を求められた。実験参加者は実験用の椅子に着席した。(1)実験参加者の視軸が水平に保たれ、また姿勢が安楽に維持できるように背もたれの角度が調節された。

次に (2)足底が届き、実験参加者の視軸と PC 画面の中心 (上の二本線の接点)が水平になるよう椅子の高さ、続いて実験参加者の前に設置された chin-rest の高さが調整された。次に (3)眼球から PC 画面までの距離 (500 mm)かつ視軸が底線の中点に維持される位置に、椅子および chin-rest の前後および左右の微調整が行われた。

実験開始前に練習試行が行われ、コントローラの三操作 (表示・調整→終了→確定)が間違えることなく、暗所でもできることが確認された。実験課題は、底線 (50 mm)に対して、5 か所のいずれかの位置から帆線を伸縮させ、同じ長さに調整することだった。実験参加者は開始ボタンによって、表示された底線と帆線の長さが等しくなるようジョイスティックを操作した。そして、底線と帆線の長さが等しいと判断した場合、終了ボタンを押し一試行を終えた。いずれの条件においても実験参加者は同じ調整法で試行を行った。

なお、明暗実験で配慮すべきことは、順応への対応だった。明順応 (~ 60 秒)に比較して、暗順応は、順応時間に依存して知覚される明るさが影響を受けることが報告されている (Hartline, 1940; 松田, 1995)。しかし、実験時間の制約および実験参加者の負担もあり、本実験では照度条件間の順応時間は 2 分間とした。一試行は 10 秒から 10 数秒程度と短時間であるが、暗所、明所での単調な繰り返し試行であるため眼精および精神疲労等を配慮し、休息を入れ実験参加者の要望にも応じた。休息中は実験室の照度は 80 lx にした。実験時間は約 70 ~ 120 分程度を要した。

第 4 項 錯視量の定義






実験により PC に記録された PSE (mm)を用いて、底線 (100%)を基準として、底線よりも短く知覚した場合の錯視量 (錯視の強さ)を $PSE < 100\%$ とし、逆に長く知覚した場合

の錯視量を $PSE > 100\%$ と示した。例えば、錯視量が 120% であれば、底線よりも 20% 長く知覚したことを表し、錯視量が 85% であれば底線よりも 15% 短く知覚したことを表している。

第5項 分析方法

PSE が記録された Excel データは IBM SPSS Statistics 22 (Windows 7) によって記述統計および統計処理を行った。各条件、6 試行の平均値を代表値とし、各実験参加者のデータを条件ごとに錯視量をまとめた。序論で設定した仮説 1 (明暗の影響)、仮説 2 (明暗と接点位置の影響) について、実験参加者の代表値に対して、対応のある \times 対応のある二要因分散分析 (7 照度 \times 5 接点位置) を実施した。統計の有意水準は 5% ($p < .05$) とした (竹原, 2013)。

Table 4 照度・位置条件別の錯視量 (%) の平均値および標準偏差 (小原・川合, 2020b)

Vision	illumination (lx)		Contact position				
							
Scotopic	<1.0	mean	86.8	91.4	87.4	92.2	89.4
		S.D.	4.5	5.6	8.0	6.9	5.4
Mesopic	10	mean	86.7	88.9	85.8	89.2	87.9
		S.D.	6.1	7.5	9.3	7.9	5.9
Photopic	20	mean	87.3	89.1	84.7	89.8	88.6
		S.D.	6.0	7.2	8.5	7.1	5.8
	40	mean	86.3	88.6	85.4	90.3	87.9
		S.D.	5.8	5.2	6.9	8.2	7.7
	80	mean	86.0	88.9	84.2	89.5	87.0
		S.D.	5.5	7.2	7.9	6.1	5.9
	160	mean	86.8	89.7	84.2	89.6	87.6
		S.D.	5.4	8.0	8.2	7.6	5.3
	320	mean	86.8	88.8	85.3	90.1	87.9
		S.D.	6.3	7.8	8.7	8.3	5.5
	Average	mean	86.9	88.2	84.8	89.0	87.9
		S.D.	5.9	6.8	8.1	6.8	5.6

第3節 結果

Table 4 (p.66)は、照度および接点位置の各条件別の錯視量 (%)の平均値および標準偏差を示している。行に照度条件、列に接点位置の結果を示した。明所視では各照度条件に加えて 5 条件の各実験参加者の平均値 (average)も合わせて示した。すべての錯視量はいずれの照度条件および接点位置において、底線 (50 mm)よりも短く評価された。

二要因分散分析 (7 照度×5 接点位置)の結果からは、照度 ($F(6, 162) = 4.98, p < .001$) および接点位置 ($F(1.78, 48.17) = 8.34, p < .001$)にはいずれも有意な主効果が見られた。次に照度と接点位置の交互作用効果については有意でなかった ($F(8.64, 233.4) = 1.35, n.s.$)。多重比較 (Bonferroni)の結果からは、照度については、暗所視(< 1.0 lx)条件と明所視の 20 lx ($p < .05$), 80 lx ($p < .001$), 160 lx ($p < .05$)との間にそれぞれ有意差が認められた。つまり、暗所視の方が明所視に比べて有意に錯視の影響が減弱し、最大では 18.25% 程度減弱された。次に接点位置については、接点位置「0」と「-1」間 ($p < .001$), 「0」と「+1」間 ($p < .001$), 「-2」と「+1」間 ($p < .05$)において有意差が認められた。つまり、中点を底とし、中点と端点との間で錯視量が減弱する M 字型を呈した。

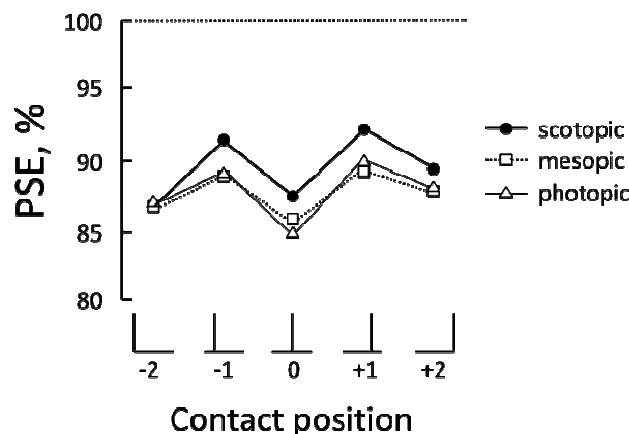


Figure 13 明暗に対する錯視量曲線

暗所視 (●), 薄明視 (□)および明所視 (△ : 5 条件の平均)を示している。横軸は接点位置を示し、縦軸は PSE を示し底線 (100%; 50 mm)に対する割合 (%)として表している。したがって点線では底線と PSE の値が等しく錯視が生じていない。点線の下方向が PSE < 100%となり帆線分が過大視され錯視が生じていることを意味している。小原・川合 (2020b)から抜粋した。

Figure 13 (p.67)は、明所視の 5 条件間に有意差が認められなかったことから、各実験参加者の平均値 (Table 4; p.66: Average)を明所視の代表値として、暗所視 (< 1.0 lx)、薄明視 (10 lx)の結果とともにカテゴリー別に示している。図や表からも明らかなように、例えば明所視 (320 lx)の場合、左右端点の「-2」では 86.8%、「+2」では 87.9%であり、中点「0」では 85.3%、端点と中点の間である「-1」では 88.8%、「+1」では 90.1%であった。また暗所視 (0 lx)の場合では、左右端点の「-2」では 86.8%、「+2」では 89.4%であり、中点「0」では 87.4%、端点と中点の間である「-1」では 91.4%、「+1」では 92.2%であった。他の条件においても同様の結果となっており、接点位置に対する錯視の現れ方は、照度に関わらず、中点を底とする M 字型を呈した。二要因分散分析(明暗所視×接点位置)の結果でも、明暗所視の主効果 ($F(1.47, 39.76) = 10.53, p < .001$)および接点位置の主効果 ($F(1.78, 47.93) = 7.68, p < .01$)はいずれの要因も有意であった。しかし、明暗所視と接点位置の交互作用効果は認められなかった ($F(4.43, 119.58) = 2.23, n.s.$)。多重比較の結果からは、明暗所視については、「暗所視」と「薄明視」との間 ($p < .05$)、「暗所視」と「明所視」との間に有意差が認められた。また接点位置については、「-2」と「+1」 ($p < .05$)、「-2」と「+2」 ($p < .05$)、「-1」と「0」 ($p < .001$)、「0」と「+1」 ($p < .001$)との間に有意な差異が認められた。

以上の結果から、照度は、錯視量の強さに影響し、暗所視の方が薄明視や明所視に比較して錯視量が減弱した。しかし接点位置に対する錯視の現れ方は、照度にかかわらず中点を底として、中点と端点間で減弱される M 字型を呈した。

第 4 節 考察

明暗が VHI の錯視量の現れ方に及ぼす影響を検証した。先行研究では、先述したように対立が見られていた。そこで本研究では人間の眼は桿体細胞と錐体細胞によって成り立っていることから、明るさによりそれらの細胞が別々に反応することから VHI の錯視量は影響を受け、明るい方が暗い方よりも強くなるとする Künnapas (1957b)の結果を仮説 1 とした。さらに、明暗が接点位置の現れ方にも影響を及ぼすのかについては、接点位置が視空間処理に依存している (Wolfe et al., 2005)、また、明所視での錯視量の変化形状は V 字型 (Künnapas, 1955a)であり、暗所視での錯視量の変化の形状は M 字型になる (Marma et al., 2015)ことから、「接点位置に対する錯視量の変化は、明所視では V 字型、そして暗

くなるにつれて M 字型 に変化するとした。」を仮説 2 として、実験を行った。

結果は、明暗は VHI の錯視量に影響し、暗所視 (< 1.0 lx)の方が薄明視 (1.0 ~ 10 lx)や明所視 (20 lx <)よりも有意に減弱し、「影響を受けない」という Avery & Day (1969) の主張を退け「暗所視の方が減弱する」という Künnapas (1957b)の主張を採択した。次に接点位置への現れ方への明暗の影響については、明暗の程度に関わらず一貫して M 字型の錯視量変化を呈した。したがって、Künnapas (1955a)が報告した V 字型を呈した結果は明暗によるものではないことが確認できただけでなく、接点位置によって生じる M 字型変化は暗所視だけでなく、薄明視や明所視にも当てはまる普遍的な現象であることが明らかになった。

しかし、この結果から確認すべき新たな問題が見出された。それは、明るさが錯視量に影響するとすれば、明暗に対する順応時間もまた錯視に影響する可能性として考えざるを得ないという問題である。特に暗順応では、明順応の即応性 (15 ~ 60 秒)に比べ、適応にかなり長い時間 (~ 30 分)を要し、また、経過時間と知覚される明るさの間には非直線的な関係が報告されている。つまり暗所ではより長く順応に時間をかけたほうが、同じ光源であっても感度が上がり観察者の感じる明るさが異なってくる (Hartline, 1940)。このことについては、改めて要因として検討する必要がある。

さらに、ここで気にしなければならないことは、今回照度を制御するために使用した LED や PC の画面自体がフレームとなっていないかどうかである。フレームの影響は、形状・大きさ・複雑さなど様々な視点があるが、形状一つをとっても横に長いフレームと縦に長いフレームで錯視量に影響を与えるとする研究者 (cf. Künnapas, 1957a)と変わらないとする研究者 (cf. Avery & Day, 1969)がおり、いまだに結果に対立がある。本研究では、Figure 11 (p.62)の通り、明所視・薄明視・暗所視のどの条件でも同じフレームが見えている。このことから、Künnapas (1957a)の主張通りに「VHI にはフレームの影響がある」と仮定しても、どの条件下にも当てはまることであるため、影響は相殺できると考えられる。但し、今回フレームについては統制したわけではないので、これ以上の言及は避けることとする。

明所視は、中心窩付近の錐体細胞の多い領域で処理されるため錐体視 (Cone vision)とも呼ばれ、暗所視は、中心窩の周辺の桿体細胞の多い領域で処理されるため桿体視 (Rod vision)とも呼ばれる。そして照度によってこれら視細胞が異なって関与することはよく知られている (松田, 1995)。そして、明暗の変化に応じて錯視の感受性がそして、明暗の変

化に応じて錯視の感受性が明所視の方が暗所視よりも錯視が弱くなるという影響を受けたこと、また、暗所への順応時間も錯視の感受性に影響したという本結果を考慮すると、本研究の結果は、暗所条件で活躍する桿体細胞が強く機能した可能性が示唆される。桿体細胞は、輪郭や白黒のエッジなどの処理に貢献しており、幾何学的錯視図形の図形知覚に関与していることもよく知られている（松田, 1995）。

ここで興味深いのは桿体細胞の網膜上の分布特性である。Figure 14-A に、視細胞の一般的な分布図（Pirenne, 1967）を示す。水平断面図（Figure 14-A）でみると桿体細胞は中心窩では激減し周辺 20 ~ 30° でもっとも多く、以後、角度が広がるに連れて減少するという M 字型を呈している。さらに細胞の多さは感受性に影響するため、接点位置の変化に伴って M 字型に変動する錯視量は、桿体細胞に依存している可能性が考えられる。

Wolfe et al. (2005)は、水平線分 (27.3 mm)の接点位置を 11 に細分し、垂直線分への錯視量を調べ、個人差を考慮して標準化したうえで錯視量の変化パターンを比較した。結果は、垂直線分が中点から少しでも左右にずれると ($\pm 10\%$)、途端に急激な減弱 (steepest decrease, p.972)が生じると報告した。Wolfe et al. (2005)自身は、この劇的な減少を垂直線と水平線の対称性の崩れで説明しようとしているが、対称性の崩れだけでは変化のパターンが説明できないこともまた認めている。それに対して、網膜での視細胞の分布図 (Fi-

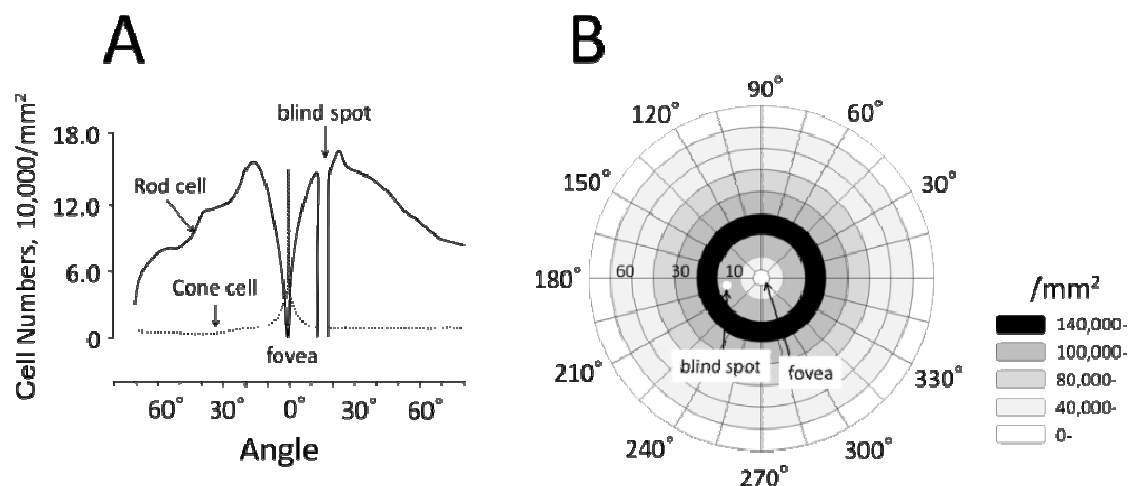


Figure 14 視細胞の分布

A は Pirenne (1967)の知見を改変した。桿体 (Rod)と錐体 (Cone)の分布 (左眼：水平断面位)。中心窩 (fovea)では錐体が占め、20~30° で桿体が最大となる。B は桿体細胞の分布を、網膜全体として模式化 (左眼)。小原・川合 (2020b)から抜粋した。

figure 14-A; p.70)に目を向けると、中心窩から極めて狭い領域で桿体細胞が激減している点や分布のピークなどは錯視量の変化特性によく符合している。

次に、VHI における錯視量の M 字型の変動は、単眼でも、両眼でも、図形の縦横の向きを変化させても変わらなかったことを考えると（小原・渡邊・川合，2016a, b），水平断面（Figure 14-A; p.70）で考えるよりも，網膜上の桿体細胞の分布として模式化（Figure 14-B; p.70）すると説明が可能となる。そして本結果は，この分布に依存した M 字型の変動が，変動の現れ方を変えることなく，明暗に基づく感受性の変化だけが影響したと推察した。またこれは松田（1995）が示す明るさによって関与する視細胞が異なり，明所視は錐体視，暗所視は桿体視とさえ呼ばれるということからも関係性があるように考えられる。しかし，この部分に言及するためには，本実験の条件では短時間提示などによる眼球運動を抑制する要因の統制を行っていないため，今後の研究課題にしたい。

本研究では，VHI の基本となる底線と帆線との接点位置に関して，周囲の明るさを変えた環境（暗所視，薄明視および明所視）下での錯視量の変化について明らかにした。しかし，今回の検証でさらに解明が必要になった要因として，提示時間の長さ，視細胞の影響および Künnapas (1955a)が示した V 字型の原因の究明がある。さらに，本研究の目的である視知覚機構の解明のためには，他の物理的要因（たとえば二本線のなす角度，俯仰角，背景など）や観測者要因（姿勢，性差，感覚など）について今後とも明らかにする必要がある。

第 4 章 観察者の俯仰瞰が錯視量変化に及ぼす影響

第 1 節 VHI の刺激図形に関わる実験の変遷

筆者らは、視知覚機構解明を視野に入れ、VHI の刺激図形に関わる要因を操作し、観察者から得られる錯視量を手がかりに実験を行ってきた（小原・川合, 2020a, b）。その結果、(1)水平線上で垂直線を左右に動かすと、垂直線が長く知覚される錯視量は中点では最大で、中点と端点との間は小さくなり、端点では中点ほどではないが再び増加する M 字型に変化し、これまでの中点が最大で端点に近づくにつれて小さくなる V 字型という知見とは異なること（Künnapas, 1955a）、(2)図形を回転させ、垂直方向と水平方向を入れ替えると錯視量変化が異なることによる垂直と水平軸の異方性が確認されたこと、(3)単眼視と両眼視では生じる錯視量に差がないことが明らかになった（小原・川合, 2020a）。また、実験室や刺激図形の明るさを操作すると、明所視での錯視量の変化に比べ、薄明視や暗所視での錯視量の変化が減少し、錯視が減弱されるなど新たな知見を報告した（小原・川合, 2020b）。

しかし、これらの実験では、刺激として用いた VHI 図形は、常に観察者の前額面に平行に提示された。つまり、図形上の二つの線分は、二次元（縦横）平面上で位置や長さが変化していたこととなる。しかし、我々の現実世界では、もう一次元、すなわち奥行（前後）軸が存在しており、人間の視知覚機構の解明にアプローチするためには、奥行（前後）要因と人間に知覚される長さとの関係について明らかにすることは極めて重要と考える。

そこで、奥行要因に着目した先行研究を振り返ってみると、von Collani (1985)は、逆 L 字図形を前額面（90°）に対して観察者に近づく方向に +37.4° および +57.3° 傾け、水平位の基準線の長さ（100%）に対して垂直位にある調整線の PSE を測定した。その結果 90° での PSE が 93.4%で過大視が見られ、+37.4° 傾けたときの PSE は 96.7%と過大視がやや減弱した。そしてさらに +57.3° まで傾けると PSE は 103.2%となり、逆に過小視に転じた（Figure 15 の□印; p.73）。それゆえ PSE と傾斜角度との関係は観察者側から前額面にかけて「右下がり」の変化プロフィールと捉えることができる。

また安岡・石井 (2014)は、逆 T 字図形（Figure 15 の●印; p.73）および T 字図形（Figure 15 の△印; p.73）を用いて、前額面（0°）に対して観察側に 3 段階（+45°、+30°、+15°）、観察者から遠のく方向に 3 段階（-15°、-30°、-45°）に傾け、各条件での PSE

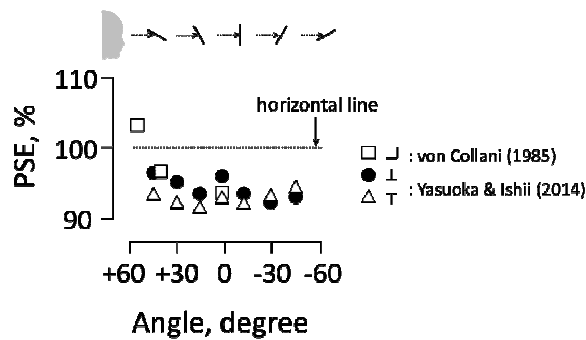


Figure 15 俯仰瞰角度の錯視量への影響 (von Collani (1985), 安岡・石井 (2014)の図を改変)

刺激図形を観察者に近づく (仰瞰) 方向あるいは遠ざかる (俯瞰) 方向に変化させたときの垂直線分の PSE。点線は水平線の長さを 100% としている。□は L 字図形 (von Collani, 1985, p.552, Table 2), ●と△はそれぞれ逆 T 字図形と T 字図形図 (安岡 & 石井, 2014, p.34, Figure 4) の結果である。小原・川合 (2021) から抜粋した。

を測定した。結果はすべての範囲において調整線の方が過大視され、垂直線の実際の長さが基準線よりも短く評価された。全体として逆 T 字図形 (●: PSE = 93.1% ~ 96.4%) よりも T 字図形 (△: PSE = 91.2% ~ 94.5%) の方がより錯視が強く現れた。PSE と傾斜角度との関係を質的に捉えると、逆 T 字図形においては観察者側 (+60°) から遠のく方向 (-60°) にかけて「右下がり」の傾向を示しているが、0° における錯視量の若干の減弱を反映して「右下がりの W 型」の変化プロフィールと捉えることができる。一方、T 字図形においては「右上がり」あるいは「W 型」のプロフィールと捉えることができる。

以上の先行研究からは、前額面付近 (0° ~ ±15°) では錯視が最も強く現れることは共有できる。しかしながら、前後に組織的に傾斜させたときの知見が少なく、また接点位置との関係性も、異なる錯視図形が用いられていることから、俯仰瞰角度の変化に対する錯視の現れ方がどのようなものかを判断することは難しい。

このため、本研究では、VHI 図形に対して俯仰瞰角度および接点位置の二要因を変化させたときの VHI に及ぼす質的および量的変化を検証する。俯仰瞰角度に対しては、VHI 図形の水平線を基準軸として、観察者の視軸に対して手前側へ傾けたり、奥側へ傾けたりすることによって、垂直線に三次元的要素を加えることにした。このことにより、観察者と水平線との距離を一定に保つことが可能であり、基準となる物理的な長さを一定に保つことができる。また、接点位置に対しては、提示する図形を逆 L 字・逆 T 字・L 字のよう

に組織的に変化させた。

実験仮説は、先行研究の知見に基づき以下のように立てた。仮説 1 としては、調整される垂直線の錯視量は俯仰瞰角度の影響は受けるが、いずれの角度条件でも垂直線に過大視が生じる（安岡・石井, 2014; cf. von Collani, 1985）。次に仮説 2 は、観察者から等距離にある刺激は傾斜角度が同じなら、網膜に投影される像の長さも等しくなるので（von Collani, 1985）、傾斜の方向には影響を受けず、前額面（0°）を軸とした対称的な錯視量変化を示す（安岡・石井, 2014）とした。また、仮説 3 として二線の接点位置の影響については、観察者と水平線は常に等距離にあり、垂直線は水平線とは常に直角にあることから、錯視量の変化は V 字型パターン（Künnapas, 1955a）ではなく、（M 字型パターン（Marma, Bulatov, & Bulatova, 2015; 小原・川合, 2020a, b）が維持されるとした。

第 2 節 方法

第 1 項 実験参加者

健康な 23 名の実験参加者（男性 13 名、女性 10 名：平均年齢 20.83 ± 1.40 歳）が同意の上実験に参加した。実験参加者すべてにおいて、課題遂行のための知覚運動機能および視覚機能に支障はなかった。また日常生活において眼鏡やコンタクトを着用している実験参加者はそれらを着用して課題を行った。なお実験の仮説については知らなかった。本実験は帝塚山大学研究倫理委員会の承認（29-32）を経て実験参加者に対して倫理的配慮の下に実施した。

第 2 項 実験環境

VHI 図形

Figure 16 (p.75)に実験の概略図を示した。実験刺激（VHI）の提示、操作およびデータの記録は PC (Windows 7)上で行った（Figure 16-A; p.75）。Visual Studio 2012 (Microsoft 社製)を用いて、以下のように刺激提示、調整線の調整、各試行の記録ができるプログラムを作成した。刺激図形は、実験参加者（Figure 16-C; p.75）の前に垂直に設置されたフルフ

ラットな PC 画面 (Figure 16-B; シャープ(株)製, 15 inch 液晶カラーモニタ, LL-T15G4-H, Japan)上に提示された。基準線となる水平線の長さは 50 mm (172 pixel), 幅 3 mm (10 pixel)で PC 画面の中央に水平位に提示された。

一方, 実験参加者が長さを調整する垂直線 (幅 3mm)は, 基準線を 5 等分した開始点のいずれかが基準線と同時に提示され, その点から垂直方向に線分を伸縮できるようにした。調整線の長さの調整はゲームコントローラ (Figure 16-E; 株ホリ製, HORIPAD FPS PLUS, Japan)を用いて実験参加者自らが容易に調整できるようにした。操作に不慣れな実験参加者も容易に理解し, また暗室でも容易に操作できるよう 3 操作で一試行が完結で

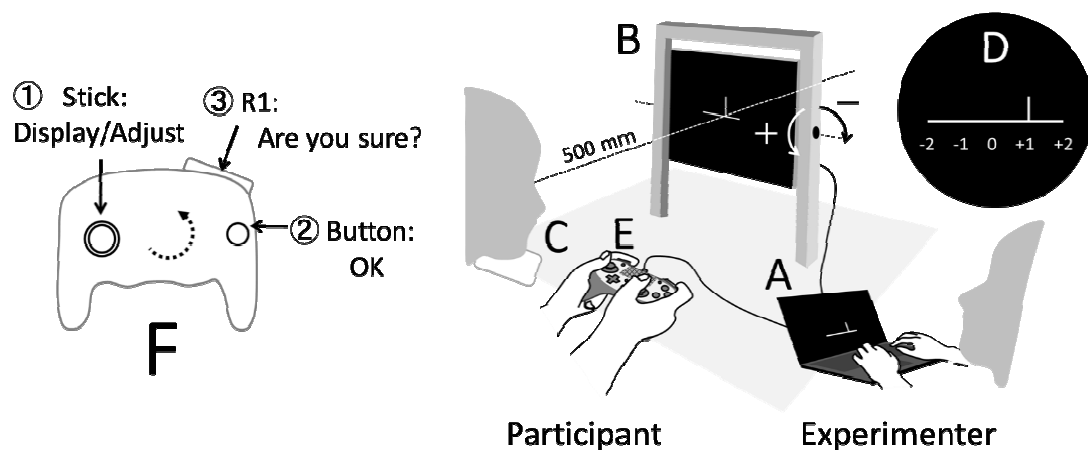


Figure 16 実験の模式図 (右)とコントローラ (左)

実験は実験者の PC (A)ですべて制御された。刺激図形は chin-rest (C)に顎を載せた実験参加者から 500 mm の距離にある画面 (B)に表示された。基準となる水平線 (50 mm)上の 5 つの接点位置 (D)のいずれかの点から任意の長さの垂直線が表示された。実験参加者はゲームコントローラ (E)のボタンとジョイスティックを操作 (F)して水平線と同じ長さになるように垂直線の長さを調整した。画面 (B) は刺激画面の水平線を回転軸として, 垂直位 (0°)を挟んで, 実験参加者に近寄る方向に 4 水準 ($+15^\circ$, $+30^\circ$, $+45^\circ$, $+60^\circ$), 遠ざかる方向に 5 水準 (-15° , -30° , -45° , -60° , -75°)に傾斜させた。図に示すように, 日常生活との関連では+の回転では, 垂直線を斜め上から見下ろす (Depressing view)に当てはまり, -の回転では垂直線を斜め下から見上げる (Elevation view)に当てはまる。実験室はほとんど真っ暗 (6.0 lx)にできたが, 刺激を含め 44.0 lx の照度は免れなかった。小原・川合 (2021)から抜粋した。

きるようにした(Figure 16-F; p.75)。すなわち、① ジョイスティック (左) に触れると図形表示と長さの調整開始、② [右○]ボタンで調整終了、③ [R1]ボタンで確定一試行終了の3操作だった。[R1]ボタンの設定は、実験参加者が確認、再調整できるという意味だけでなく、指先からの能動触覚ではなく (Heller & Joyner, 1993; Heller, Calcaterra, Burson, & Green, 1997), 視覚からのフィードバックに最終的に依存するという意味で重要だった。試行から得られた実験参加者のデータは、自動的に条件や実験参加者の情報とともに記録され、その後の分析に用いられた。ジョイスティックの移動方向と調整線の伸縮方向は一致させ 3 pixel/秒で描画させた。調整線の解像度は 5 pixel (1.45 mm)だった。なお、実験参加者の操作はすべて実験者用 PC 画面 (Figure 16-A; p.75)に表示させ、実験者が確認することができた。

実験参加者用 PC 画面 (Figure 16-B; p.75)は、画面上に映る図形の水平線を回転軸として回転させることができた。実験参加者の視軸と垂直となる条件を 0° として、実験参加者側に 15° ずつ傾斜する方向 (+)に 4 水準、 15° ずつ遠ざかる方向 (-)に 5 水準に傾斜させた。実験参加者側が 1 水準 ($+75^{\circ}$) 少ないのは画面自体の制約による。なお、+側の見えは実験参加者が図形の垂直線を斜め上から見下ろすことになるので俯瞰条件 (Depression condition), 反対に一侧の見えはそれを斜め下から見上げることになるので仰瞰条件 (Elevation condition)と定義した。

要因の操作

俯仰瞰角度 (10 条件) および接点位置 (5 条件)の二要因を実験変数とした。画面が垂直の場合を 0° として、俯瞰条件は 4 水準 ($+15^{\circ}$, $+30^{\circ}$, $+45^{\circ}$, $+60^{\circ}$), 仰瞰条件は 5 水準 (-15° , -30° , -45° , -60° , -75°)とした。接点位置は 5 水準とし、基準線の左端点から -2 (-25 mm), -1 (-12.5 mm), 0 (中点), +1 (+12.5 mm), +2 (+25 mm)とした (Figure 16-D; p.75)。基準線と同時に提示される調整線の長さの初期値は、基準線よりも任意に短い線分 (50 mm 未満: 上昇系列)あるいは長い線分 (50 mm 以上: 下降系列)を提示し系列効果を相殺した。角度および接点位置に対して、基準線よりも短い上昇系列と長い下行系列をそれぞれ 2 試行ずつ実施した。結果、各条件を 4 試行行い、実験参加者の総試行数は 200 ($10 \times 5 \times 4$)試行となった。なお角度条件は実験参加者間でカウンターバランスをとり、設定位置の提示については疑似ランダムな順序で与えた。

第3項 実験手続き

実験参加者は実験についての説明を受け、実験参加の同意を求められた。そして実験用の椅子に着席した。まず (1)実験参加者の視軸が水平に保たれ、また姿勢が安楽に維持できるように背もたれの角度が調節された。次に (2)足底が届き、参加者の視軸と PC 画面の中心 (上の二本線の接点)が水平になるように、椅子の高さ、続いて実験参加者の顔前の chin-rest の高さが調整された (Figure 16-C; p.75)。次に (3)眼球から PC 画面までの距離 (500 mm)かつ視軸が基準線の中点に維持される位置に、椅子および chin-rest の前後および左右の微調整が行われた。

実験開始前に練習試行が行われ、コントローラの 3 操作 (Figure 16-F; p.75; 表示/調整→終了→確定)が間違えることなく、また暗室 (44 lx 未満)でも操作できることを確認した。実験課題は、基準線 (50 mm)に対して、5 か所のいずれかの位置から提示される任意の長さの調整線を伸縮させ、同じ長さに調整することだった。実験参加者がジョイスティックに触れると、基準線と同時に調整線が 5 か所の接点のいずれかから提示された (Figure 16-D; p.75)。実験参加者は、調整線の長さが基準線と等しくなるようジョイスティックを前後に操作し、基準線と調整線の長さが等しいと判断した場合、右○ボタンを押し一試行を終えた。

1 試行は 10 秒から 10 数秒程度と短時間であるが、単調な繰り返し試行であるため眼精および精神疲労等を配慮し、休息を入れ実験参加者の要望にも応じた。休息中は実験室の照度は 80 lx にした。実験時間は約 70 ~ 120 分程度を要した。

第4項 錯視量の定義

PC に記録された調整線の長さから基準線 (50 mm)に対する PSE (%)を算出し、基準線 (100%)に対する錯視量 (錯視の強さ)とした。したがって、 $PSE = 100\%$ のときは調整線と基準線が等しく錯視がないことを示す。基準線よりも PSE が小さく評価された場合 ($PSE < 50\text{ mm} = 100\%$)が、「同じ長さの二本の直線のうち、垂直線が長く (過大に)見える」VHI を捉えていることになる。逆に、PSE が長く評価された場合 ($PSE > 50\text{ mm} = 100\%$)は、垂直線が短く (過小に)見えることになる。例えば、ある条件で 50 mm の基準線に対して調整された線分が 45 mm と 55 mm であったとすると、前者は VHI を反映するので過大

視と呼び量的には $PSE = 90\%$ と表記する。一方、後者は逆方向の現象となるので過小視と呼び $PSE = 110\%$ と表記する。

第5項 分析方法
















Excel 処理されたデータを IBM SPSS Statistics 22 (Windows 7)によって記述統計および統計処理を行った。各条件 4 試行の PSE の平均値を代表値とし、各実験参加者のデータを条件ごとに錯視量をまとめた。仮説 1 (錯視の方向)、仮説 2 (俯仰瞰角度の影響)および仮説 3 (接点位置の影響)を検証するため、実験参加者の代表値に対して対応のある×対応のある二要因分散分析 (10 角度×5 接点位置)を実施した。統計の有意水準は 5% ($p < .05$)とした (竹原, 2013)。

第3節 結果

Table 5 (p.78)は、俯仰瞰角度および接点位置の各条件別の PSE (%)の平均値および標準偏差を示している。行に角度条件、列に接点位置の結果を示した。二要因分散分析 (10 俯仰瞰角度×5 接点位置)の結果からは、俯仰瞰角度 ($F(1.87, 41.15) = 7.45, p < .01$)および接点位置 ($F(1.99, 43.73) = 10.26, p < .01$)にはいずれも有意な主効果が見られた。また俯仰瞰角度と接点位置の交互作用効果についても有意差が見られた ($F(36, 792) = 2.75, p < .01$)。そこで単純主効果の検定を行うと、各角度条件において接点位置 0 と -1 および 0 と 1 の間に有意な差が認められた ($p < .05$)。多重比較 (Bonferroni 法)では、 $+60^\circ$ と -45° 、 -60° および $+75^\circ$ のそれぞれとの間に、また $+45^\circ$ と -30° 、 -45° および -60° のそれぞれとの間に、 $+30^\circ$ と -15° 、 -30° および -45° のそれぞれとの間に有意な差が認められた ($p < .05$)。次に接点位置については「-2」と「-1」および「-2」と「1」の間に、また「0」と「-1」および「0」と「1」の間に有意差が認められた ($p < .05$)。

Figure 17 (p.79)は、Table 5 (p.79)の結果をもとに、俯仰瞰角度および接点位置別に PSE (%)の変化パターンを示したものである。基準となる水平線 (100%)に対する、調整された垂直線の PSE (%)の平均値を角度別および接点位置別に示している。全体的にみると、俯瞰条件 ($+15^\circ \sim +60^\circ$)で過小視、仰瞰条件 ($-15^\circ \sim -75^\circ$)では過大視が強くなっている。中点と端点の間 (△および▲)では全体的に過小視が顕著であった。また端点 (□

Table 5 俯仰瞰角度別および接点位置別の錯視量 (%)の平均値および標準偏差 (小原・川合, 2021)

Observer's line of sight	Angle, degree			Contact Position				
				-2	-1	0	+1	+2
								
Depression	+60		Mean	102.74	105.69	101.60	105.12	104.45
			SD	5.71	6.71	7.22	7.49	6.60
	+45		Mean	102.40	106.70	101.45	106.40	105.27
			SD	7.25	9.83	10.05	9.67	7.61
	+30		Mean	101.80	107.59	100.58	106.74	104.58
			SD	7.87	11.52	12.05	10.95	7.88
	+15		Mean	100.43	106.79	99.29	106.19	103.02
			SD	8.31	13.65	12.98	12.32	8.48
Orthogonal	0		Mean	100.02	105.52	98.84	106.01	101.56
			SD	8.05	13.63	14.96	13.08	7.32
Elevation	-15		Mean	99.29	104.32	98.37	104.89	100.30
			SD	7.16	12.28	14.50	12.20	6.45
	-30		Mean	98.51	102.94	97.24	103.82	99.36
			SD	6.28	10.71	11.90	10.75	5.86
	-45		Mean	98.21	101.87	96.84	102.38	99.37
			SD	4.59	8.44	9.06	8.66	4.47
	-60		Mean	98.36	100.80	97.28	101.16	99.26
			SD	3.44	5.96	6.05	5.98	3.00
	-75		Mean	99.06	100.28	98.48	100.54	99.58
			SD	1.67	2.99	2.96	2.79	1.37

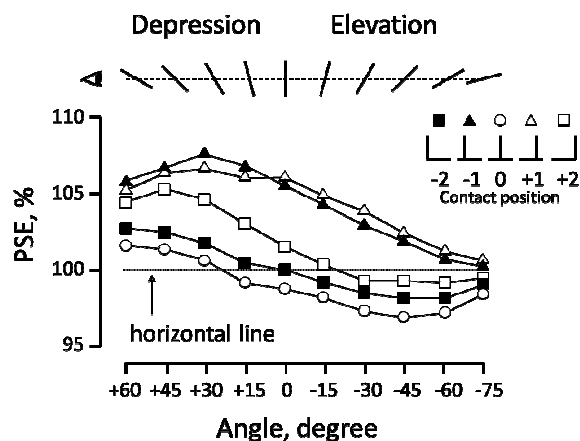


Figure 17 俯仰瞰角度別および接点位置別にみた PSE の平均値 (%)

基準線 (100%)に対する調整線の PSE (%)の平均値を俯仰瞰角度別および接点位置別に示している。縦軸に PSE (%)を、横軸には角度を示している。俯瞰条件 (+15° ~ +60°) で過小視が生じ、仰瞰条件 (-15° ~ -75°) では過大視が強くなっている。中点と端点の間 (△および▲)では全体的に過小視が際立ち、端点 (□および■)では、前額平面 (0°) を境に、俯瞰条件で過小視、仰瞰条件で過大視と逆転する。小原・川合 (2021)から抜粋した。

および■)や中点(○)では、前額平面(0°)付近を境として俯瞰条件で過小視、仰瞰条件で過大視を呈した。すなわち、図形の角度変化に対して、知覚される長さは非対称的な変化を示した。

Figure 17 (p.79)は、Table 5 (p.79)を基に、PSE の平均値を接点位置別および視線方向別に示したものである。Figure 18 左は、俯瞰条件における 4 水準 ($+15^{\circ} \sim +60^{\circ}$) の各平均値を、Figure 17 (p.79)右は、仰瞰条件における 5 水準 ($-15^{\circ} \sim -75^{\circ}$) の各平均値を、Figure 17 (p.79)中は、直交条件 (0°)での平均値を示している。

縦軸に基準線に対する PSE (%)を、横軸には接点位置を示している。基準線では錯視が生じていないことを示している (0%)。そして、基準線を下回ると垂直線は水平線よりも短く調整されたことになり、過大視、つまり「同じ長さの二本の線分では、垂直線が長く知覚される」VHI を意味している。一方、基準線を上回ると、垂直線を水平線よりも長く調整したことになり、過小視となる。いずれの図からも明らかなように、錯視量は異なるものの、いずれの条件においても、錯視量は接点位置に対して M 字型の変化パターンを示した。つまり各俯瞰条件において接点位置「+1」と「-1」が中点「0」や端点「+2」と「-2」よりも過小視の方向へ強く作用していた。

以上をまとめると、基準線に対して知覚される長さ PSE は、傾ける角度に有意に影響を受けたが、傾斜の方向によって非対称性を示した (Figure 17; p.79)。すなわち、観察者に対して近位に傾けるほど、PSE は水平線よりも大きくなり過小視が生じ、反対に遠位に傾けるほど過大視が見られた。次に、接点位置が知覚される長さ PSE に与える影響については、俯瞰条件と仰瞰条件との間に錯視の強さに有意な差異は認められたものの、観察者に対して近位に傾けても、遠位に傾けても中点を底とする M 字型パターンは維持された。

第 4 節 考察

日常生活では、対象を真横からみるだけでなく、対象の上の方から視線をやや落として観察したり、対象を持ち上げてやや下から見上げたりする。物理的に同じ長さの線分でも、平面図形において異なる長さに知覚されたが、さらに、それを上から俯瞰したり、下から仰瞰したりして、三次元的な要素が加わると、長さの見えにはどのような影響が表れるのだろうか。

日常生活において、我々は、知覚される見えを頼りに、対象と自身との空間的關係を解

積していると考えられるので、三次元的変化を加えたときの知覚される長さの組織的变化を見ることは、人間の視知覚処理機構解明、特に奥行知覚への手がかりになる可能性が期待される。

実験では、VHI が描かれた平面図形を観察者が俯瞰したり仰瞰したりしたときの錯視の表れ方や強さを系統的に測定するとともに、二線の接点位置の影響も合わせて検討した。観察者と常に一定位置にある水平線を基準線として、これを軸に近位あるいは遠位の方
向へ図形を傾斜させ、各傾斜角度において、水平線の長さと等しいと知覚される垂直線分の PSE を測定した。

実験結果からは、錯視量は傾斜角度に有意な影響を示しただけでなく、傾斜の方向にも有意な影響を受け、複雑な質的かつ量的変化を呈した (Figure 17; p.79)。すなわち、観察者の近位へ図形を傾けた場合、過小視が生じ、 $+45^{\circ}$ から $+30^{\circ}$ 付近でその度合いがピークとなった。そして真横 (0°) から観察者から遠位へ図形を傾けていくと、過小視は減弱し、 -30° 付近で水平線と垂直線がほぼ同じ長さに知覚された。さらに遠位へ傾けると過大視が生じた。

結果、先行研究 (安岡・石井, 2014) に基づいて設定した仮説 1 「俯仰瞰角度の影響は受けるが、いずれの角度条件でも過大視が生じる」および仮説 2 「傾斜の方向には影響を受けず、前額面 (0°) を軸とした対称的な錯視量変化を示す」は支持されなかった。一方、仮説 3 「接点位置に対する錯視量の変化パターンは M 字型を示す」は支持された。すなわち、俯瞰条件と仰瞰条件では錯視の方向や強さに差異が見られるものの、傾斜方向に関わらず「M 字型」の錯視量変化を示した (Figure 18; p.82)。この結果は同時に Künnapas (1955a) が報告した「V 字型」パターンが俯仰瞰角度要因によるものではないことも意味していた (Marma et al., 2015; 小原・川合, 2020a, b)。なお、接点位置に対して中点を底とする M 字型になるのかについての議論は先行研究を参照されたい (小原・川合, 2020a, b)。

第 1 項 俯仰瞰角度が錯視に及ぼす影響

本研究結果から $+60^{\circ}$ から -30° 付近まで傾斜角度の範囲で過小視、 -45° から -75° にかけて過大視の傾向が見られ、観察者の近位から遠位にかけて「右下がり」の変化プロフィールが得られた (Figure 17; p.79)。この変化は接点位置の影響も受け、水平線の中点と端点の間 (Figure 18 の△印と▲印; p.82) でもっとも強く、端点 (Figure 18 の□印と■

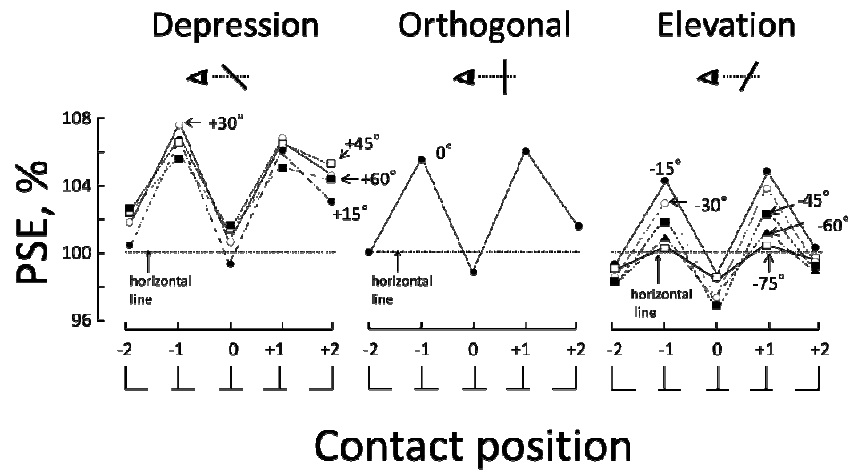


Figure 18 視線方向別に対する錯視量曲線

基準線の長さに対する錯視の強さ (%)の平均値を接点位置別および視線の方向別に示している。俯瞰条件 (左; Depression)は 4 水準 (+15° ~ +60°)の各平均値, 仰瞰条件 (右; Elevation)は 5 水準 (-15° ~ -75°)の各平均値をそれぞれ示し, 直交条件 (中; Orthogonal)は 0° の平均値を示している。縦軸に PSE (%), 横軸には接点位置を示している。基準線では錯視が生じていない (0%)。基準線を下回ると垂直線を水平線よりも短く調整したことになり, 過大視が生じている。一方, 基準線を上回ると垂直線を水平線よりも長く調整したことになり, 過小視が生じている。いずれの視線方向においても, 接点位置に対して錯視の表れ方は M 字型の変化パターンが維持されていた。小原・川合 (2021) から抜粋した。

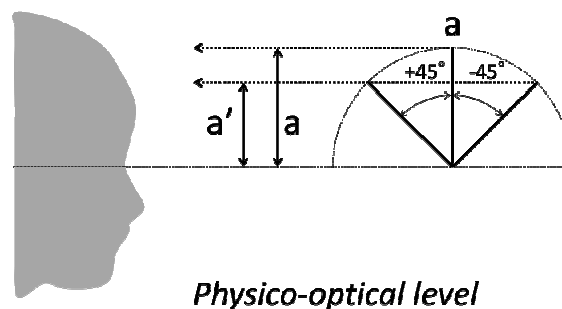


Figure 19 垂直線 (a)の傾斜が網膜上に投射される長さ (a')に及ぼす影響 (物理光学レベル)

物理光学レベルでは, 網膜上で投射される垂直線 (a)の長さ (a')は, 傾斜角度に依存するが, その方向性には影響を受けない。小原・川合 (2021)から抜粋した。

印; p.82)では中程度そして中点 (Figure 18 の○印; p.82)ではさらに角度の影響は緩やかだった。

刺激図形の線分の見えの長さが矢状方向への傾斜に左右されることについては、物理光学的観点から理論的に予想できたことである (von Collani, 1985)。つまり、Figure 19 (p.82)に示すように、線分の長さは図形平面が観察者の視軸と直交するとき以外は、距離の影響だけでなく傾斜の影響をも受け、角度の変化量に応じて網膜に投影される線分の長さは減少することになる ($a > a'$)。この場合、観察者に近づけようと遠ざけようと、傾斜角度が等しければ網膜上に投影される長さは等しくなると考えられる。

しかし、観察者が網膜像に投影されたこれら長さを処理し、解釈として出力された生物光学的な本研究結果からは、同じ角度変化量であっても、図形を近位に傾けるか遠位に傾けるかによって、知覚される線分の長さは前額面 (90°) に対して非対称的な変化を示した (Figure 17; p.79)。つまり、知覚される長さは、傾斜の角度量だけでなく、その方向性を変数にもって変化していた。なお、この方向性が、線分の直接の傾斜を手がかりにしているのか、それとも刺激自体が発する光源 (眼球の照度: 38.0 lx 未満) によってわずかに認識できる PC 画面の傾斜が手がかりになっているのかについては、本実験装置の限界から特定することはできなかった。

いずれにしても、俯仰瞰角度に伴う錯視量変化の背景にある視知覚機構をどのように理解すればよいのだろうか。これについて安岡・石井 (2014)は「遠近法理論: Perspective theory」 (Woodworth, 1938; Stacey, 1969)を掲げ、「垂直方向に置かれた線分は遠方へと延びる奥行情報をもつため、水平方向の線分よりも遠くに位置しているという解釈が作用している」からとしている。実際には、この説だけで VHI の発生機序を説明することは難しく、観察者と対象との距離と見えに生じる「大きさの恒常性: Size constancy」 (Thouless, 1931; Holway & Boring, 1941; Begelman & Steinfeld, 1971; von Collani, 1985)を組み合わせ、「遠くにあるものを大きく知覚する作用」の存在によって VHI が生じると説明される (Gregory, 1963, 1973; Girgus & Coren, 1975; Wolfe, Maloney, & Tam, 2005)。

このことを、まず観察者と対象に生じる光学物理的關係から説明する。Figure 20 (p.85)は、奥行手がかりの発生とその処理を模式的に示している。Figure 20 上の図 (p.85)では、直交座標系の視空間に浮かぶ平面上の VHI 図形の垂直線を極座標系をもつ観察者が観察しているところを示している。水平線に対して、A は 30° 上側から、B は真正面 (0°) から、C は 30° 下側から観察した例である。水平線は垂直線の下端で接し、観察者の視軸と

は常に直交している。半円は矢状方向の視野範囲 (135°) を示している。観察者は極座標系で対象の空間成分を処理するため、垂直線の上端と下端は観察者から等距離になく、結果的に視距離に差異 (depth) が生じるとともに、A では上端が近位 (点線) で下端が遠位 (実線) という遠近関係が成立する。一方 B では、逆に上端が遠位で下端が近位、また C においても上端が遠位、下端が近位という遠近関係が生じる。

Figure 20 の下の図 (p.85) は、網膜上での二線の関係を示している (Rock & Heimer, 1957; Pearce & Matin, 1969; Begelman & Steinfeld, 1971)。中心視野がより遠位 (実線)、周辺視野がより近位 (点線) の遠近関係が生じていることを模式的に示した。水平線の長さは一定に投影されるので同じ長さに示している。A では垂直線の存在する前額平面が水平線の存在する前額平面よりもより近位に、B および C では逆に遠位に投射される。その後、大きさの恒常性が機能し、これら奥行および遠近情報に基づいて垂直線の長さが重みづけられ、異なる長さに知覚される。

このモデルに基づいて、今回の実験結果 (Figure 17; p.79) を見てみる。まず、俯瞰条件 ($+60^\circ \sim +15^\circ$) の場合、水平線より垂直線は観察者に近づくことになる。このため、垂直線に大きさの恒常性が作用し水平線より短く見える錯視 (過小視) が働くことになる。角度が 0° と仰瞰条件 ($-15^\circ \sim -75^\circ$) の場合、水平線より垂直線は観察者から遠ざかることになり、同様に垂直線に大きさの恒常性が作用し水平線より長く見える錯視 (過大視) が働くことになる。これらの予想と実験結果 (Figure 17; p.79) を照らし合わせてみるとほぼ一致する。

また、安岡・石井 (2014) の実験結果 (Figure 15; p.73) も振り返ってみると、逆 T 字図形 (●) と T 字図形 (△) に生じる錯視の強さの差異についても概ね説明が可能となる。すなわち直線が水平線の上側に伸びる逆 T 字図形と下側に伸びる T 字図形とでは、垂直線と水平線との遠位関係が逆転し、俯瞰条件では T 字図形での垂直線は水平線よりも遠位となり逆 T 字図形のそれは近位となる (Figure 20-A; p.85)。それゆえ逆 T 字図形の垂直線よりも T 字図形の垂直線により強い大きさの恒常性が作用し錯視 (過大視) が強くなる。一方、仰瞰条件では T 字図形での垂直線は水平線よりも近位となり、逆 T 字図形の垂直線のそれは遠位となる (Figure 20-C; p.85)。それゆえ大きさの恒常性の影響は逆 T 字図形の垂直線よりも T 字図形の垂直線で弱まる。安岡・石井 (2014) の両図形の結果は概ねこのモデルに当てはまっているといえる (cf. -15° 条件)。

以上をまとめると、VHI 図形を観察者の矢状面上に前後に傾けて観察させたとき、垂直

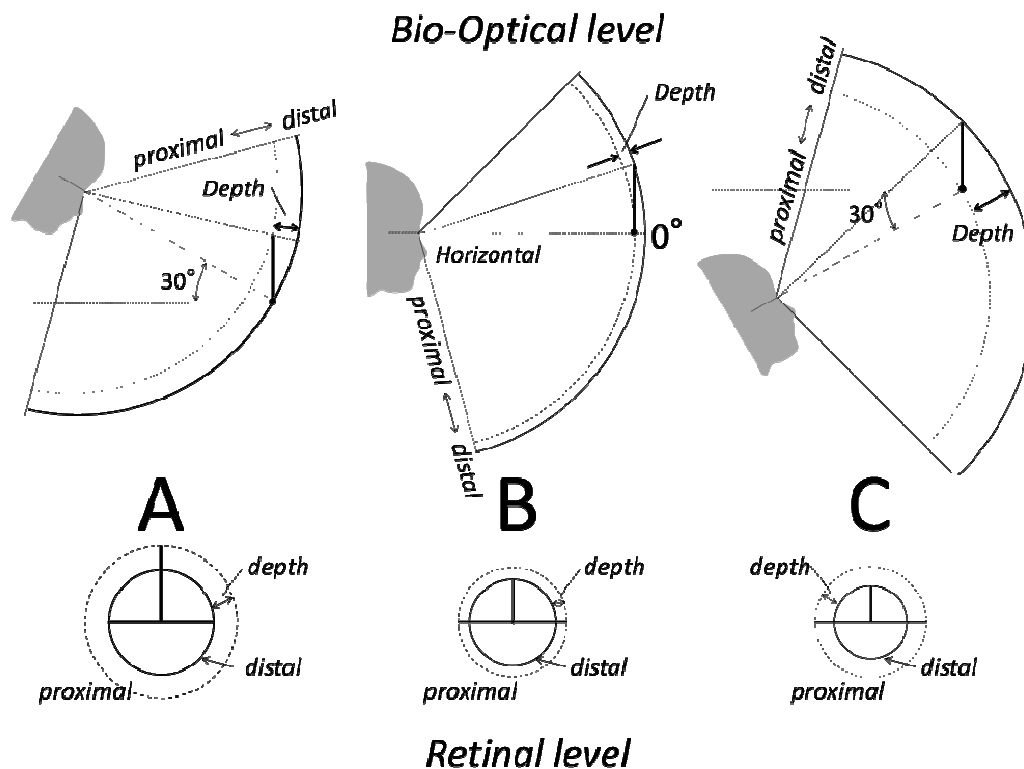


Figure 20 奥行手がかりと見えの長さの処理モデル（上：生物光学レベル，下：網膜処理レベル）

図は、直交座標系の視空間に浮かぶ平面図形上の垂直線を極座標系をもつ観察者が観察しているところを模式的に描いている。一定の長さの水平線に対して、Aは30°上側、Bは真正面（0°）、Cは30°下側から観察しているときの例である。水平線は垂直線の下端で接し、観察者の視軸とは常に直交している。半円は矢状方向の視野範囲（135°）を示している。観察者は極座標系で処理するため、垂直線の上端と下端は観察者から等距離になく視距離に差異（depth）が生じ、かつAでは上端が近位（点線）で下端が遠位（実線）、Bでは逆に上端が遠位で下端が近位、Cにおいても上端が遠位、下端が近位という遠近手がかりが生じる。下図は、網膜上に投射された二線の間隔を模式的に示している。網膜上では中心視野が遠位（実線）、周辺視野が近位（点線）の遠近関係が生じ、垂直線の存在する前額面がAでは水平線の存在する前額面よりも近位に、BおよびCでは逆に遠位に投射される。これらの情報に基づき大きさの重みづけが行われる。小原・川合（2021）から抜粋した。

線に対する錯視量は角度の影響を受けるだけでなく、傾斜の方向にも影響を受け、結果、非対称的な変化を示すことが明らかになった。この背景には、物理光学的には同じ長さの垂直線であっても (Figure 19; p.82)、観察者を中心とする極座標系に依存する網膜上では、消失点を原点として生じる垂直線と水平線の奥行関係を手がかりに、長さの重みづけがなされるためと推察した (Figure 20; p.85; Holway & Boring, 1941)。

日常生活において、我々は対象を上から見下ろしているという「俯瞰」感覚や下から見上げていう「仰瞰」感覚を知覚することができるが、その手がかりとして、本研究で得られた俯仰瞰角度とその方向から導きだされる主観量変化がこれらの感覚に関与している可能性が示唆された。つまり、俯仰瞰角度によって得られる変化関数が「どこから対象を眺めているか」という俯仰瞰感覚を可能にしているのではないだろうか。

第2項 本実験の限界と今後の展望

日常では対象を真横から観察するだけでなく、視線をやや落として俯瞰したり、やや見上げて仰瞰したりしながら対象と関わることの方がむしろ多いといえる。それゆえ本実験結果は、VHI において不十分だった俯仰瞰角度と錯視の関係を 120° の視野角度の範囲 ($+60^\circ \sim -75^\circ$) で組織的に充足した点で意義があったといえる (von Collani, 1985; 安岡・石井, 2014)。

さらに、本結果は VHI 錯視の解明だけでなく、日常の視知覚機構、特に俯仰角処理の解明にも貴重な手がかりとなる可能性があり意義が深いと考えられる。なぜならば、本実験では、VHI の錯視量を測定していることは事実ではあるが、同時にこのパラダイムは、一定の長さの水平線が、矢状方向の様々な角度から観察者にはどの程度の長さに知覚されるか、その変化の程度を組織的に測定したことも事実だからである。そして得られた錯視量の変化プロフィールは、視軸の方向性と角度変化量のいずれにも感受性をもった関数であったため、この関数が「どの高さから俯瞰あるいは仰瞰しているか」を知覚するための手がかりの可能性を示唆した。

幾何学的錯視図形において錯視が顕著に現れる背景には、三→二→三次元問題 (石井, 2006)、すなわち直交三次元の世界の情報に存在する対象を、二次元の極座標系である網膜像で処理し、さらにその生物光学的情報からまた三次元世界を再構築すること (藤田, 2007) が関わっているからではないだろうか。それゆえ、三次元情報に関与する俯仰瞰処

理に関する知見は有用な手がかりになると考えられる。

しかしその一方で、俯仰瞰角度要因の重要性に言及するためには、本実験結果の限界と不十分さにも触れておかなければならない。第一に、本実験では、矢状面に広がる観察者の視軸と垂直線との様々な相対的位置関係について、すべてを網羅していない点である。俯仰瞰角度要因を明らかにするためには、矢状面に発生する観察者と垂直線との相対的な位置関係を配慮する必要があるだろう。第二に、刺激図形を PC 画面で表示する際に微量の光源により画面の傾斜角度が錯視量に影響した可能性を払拭できなかった点である。光源を使った長さの調整を行わせる実験装置について刺激線分のみの情報に完全に依存できる装置が望まれる。

また本結果は、これまでの結果 (cf. 小原・川合, 2020a, b)と比較した際、角度が 0° のときの錯視量について齟齬が見られる。これは実験中画面の傾き角度などは実験参加者に伝えてはいないが、実際に画面を傾けて実験を行っていることから、実験参加者が無意識的に傾きを認識しようとする心の働きが影響を与えている可能性が考えられる。

結論として、刺激図形と観察者の視軸間で生じる俯仰瞰角度変化は三次元解釈に寄与するため錯視量の現れ方や強さに大きく影響することが本研究から明らかになった。それゆえ、俯仰瞰角度要因には十分に留意して実験環境を整える必要がある。そして、実験装置についても傾きにより直線の動きに若干の違和感を覚える可能性があるため、このことは今後の検討事項である。

第5章 長さ-距離不変仮説を用いた異方性の検証

第1節 異方性の傾向

VHI とは、物理的に同じ長さの二本の線分を L 字や逆 T 字に配置しそれらを観察した際に、垂直線が水平線よりもより長く見える現象をいう (Fick, 1851; Oppel, 1855; Künnapas, 1955a, b; Robinson, 1998; 大山, 2005; 北岡, 2005, 2010)。最初の報告者とされる Fick (1851)は、この現象を視空間処理における異方性 (Anisotropy)の例として紹介した。以後、この「異方性」が、我々の生物的視空間処理機構の「どこ」で「どの段階」で「どのような」に、あるいは「なぜ」生じるのかについてさまざまな視点から議論されてきた。

視空間処理に関わる構造的な特性に異方性を求める説では、眼球角膜の屈折特性 (Valentine, 1912a, b; Avery & Day, 1969; Bayer & Pressy, 1972; Thompson & Schiffman, 1974), 網膜それ自体 (Rock, 1956; Rock & Heimer, 1957; Michaels, 1960; Morinaga, Noguchi, & Ohisi, 1962; Brosvic & Cohen, 1988), 視細胞の分布特性 (Ritter, 1917; Begelman & Steinfeld, 1971), 網膜偏心距離・同心円 (Pearce & Matin, 1969; 川合, 2010), 視野の楕円性 (Künnapas, 1957a, b)などが垂直線の過大視を生じさせるとしている。

一方、機能的な特性に異方性を求める説には、眼球運動・サッケード (Wundt, 1897; Schiffman & Thompson, 1975), 重力・重力方向に対する感受性 (Higashiyama, 1996; Higashiyama & Adachi, 2006; 東山, 2012), 注目に基づく中心化効果 (Piaget, Bang, & Matalon, 1958; Gardner & Long, 1960), 一次視覚野での活動量の差異 (Yacoub, Harel, & Ugurbil, 2008) などが垂直線の過大視を生じさせるとしている。

機能的な特性でも、より高次の視空間処理過程に求めるものもある。大きさの恒常性の誤作動 (Woodworth, 1938; Gregory, 1963; Girgus & Coren, 1975; Wolfe, Maloney, & Tam, 2005; 川合, 2010), 分割効果 (Oppel, 1855; Künnapas, 1955a, Suto, 1960; Girgus & Coren, 1975; Wolfe et al., 2005; Charras & Lupiáñez, 2009, 2010; Hamburger & Hunsen, 2010; Mamassian & de Montalembert, 2010; Mikellidou & Thompson, 2013), 線遠近法 (Woodworth, 1938; Wolfe et al., 2005)などである。前者 2 つは図形の成分の相互作用 (T 接合や分割)であり、後者は観察者の消失点を起点として広がる中心および周辺視野の奥行が、異方性を引き起こすというものである。

近年、盛んに議論されているのが環境生態学的な発想である。我々の二次元網膜に映る三次元世界の見えと、実際の三次元環境から体験する実際（フィードバック）情報との確率的な相互作用に基づき、一般的な決まりごと（visual diet）として内部モデル、すなわち解釈された空間座標系（Holway & Boring, 1941）が構築され、そこに異方性が生じるとするものである。その中では Affine transformation（Westheimer, 2008）、Laplacian-of-Gaussian kernel（Craven & Watt, 1989; Buddeley & Hancock, 1991; Craven, 1993）、Range image statistics（Howe & Purves, 2002, 2005）など興味深いモデルが提案されている。

本研究でも VHI の異方性の発生機序を探るため、最も緒元的な網膜の構造的・機能的特性に異方性が存在するか否かを追試することにした。網膜由来の異方性があるかどうかを決定するためには、二線の同時あるいは継時提示に関わらず二線の配置による相互的な影響を排除しなければならない。そのため、第一に、それぞれの線分を完全に独立して提示する必要がある（McBride, Risser, & Slotnick, 1987; Brosvic & Cohen, 1988）。第二に、俯瞰・仰瞰による影響を除くために、提示される線分は、観察者の前額面に平行、すなわち観察者の視線（視軸）と垂直にする必要がある（von Collani, 1985; 安岡・石井, 2014; 小原・川合, 2021）。第三に、中心視からの偏心による影響を除くために、提示される線分の中心が、観察者の固視点（視軸）と常に、水平位に一致していることが求められる（Pearce & Matin, 1969; 川合, 2010）。これら 3 つの条件を同時に満たされた中で、垂直線の見えの長さに過大視が生じるかである。

同様の発想で試みられた先行研究を振り返ってみると、McBride et al. (1987) は、実験参加者 ($n = 35$) に 1 inch (25.4 mm) の線分をイメージして、白紙に垂直方向あるいは水平方向のいずれかの線分を描かせる課題を行った。結果は、描画された垂直線は有意に 1 inch よりも短かった (22.03 ± 4.17 mm, +13.3%)。一方、描画された水平線は正確に 1 inch が知覚され、有意な差異は認められなかった (25.92 ± 4.92 mm, -2.0%)。Brosvic & Cohen (1988) も同様の実験方法を用い、実験 1 では実験群に割り当てられた実験参加者 ($n = 20$) に、実験 2 では統制群に割り当てられた実験参加者 ($n = 46$) に対して、「できるだけ正確に 1 inch (25.4 mm) の長さ」に垂直線もしくは水平線を白紙に鉛筆で描線するよう求めた。結果は、いずれの実験でも、垂直線は短く描かれ（実験 1: 21.16 ± 3.85 mm, 実験 2: 21.88 ± 4.43 mm）、基準とした 1 inch とは有意な差が認められ、垂直線の過大視（実験 1: 16.7%, 実験 2: 14.9%）が確認された。一方、水平線は、基準とした 1 inch との間には有

意差は認められず、ほぼ正確な線分が描かれた（実験 1: 24.39 ± 4.35 mm, 実験 2: 24.49 ± 1.04 mm）。これらの結果から、いずれの研究者も VHI の形成に、分割効果や他線の相対的作用がなくても存在し、垂直線分の過大視は網膜由来であると結論づけている (McBride, et al, 1987, p.938; Brosvic & Cohen, 1988, p.468)。以後、これらの知見に基づいて、異方性の網膜由来説が他の研究者によって引用されることになった。

しかしながら、これらの実験では上述した 3 つの条件が確保されていたか疑問が残る。論文では実験参加者がどのように描線したかについての詳細な手続きの記述がなく、特に、二番目の視線の俯仰角の影響が排除されたかについては、唯一「刺激に対して正対するよう」 (keep the stimuli squarely in front of subjects, p.936; McBride, et al., 1987) という教示があるのみである。推測の域を脱しないが、いずれの実験でも、観察者は机の上に置かれた白紙の中央を見ながら描線したと推察され、机上の白紙に対して、俯瞰の影響を残したまま描画した可能性が否めない。このように観察者が平面の図形を上から見下ろ (俯瞰) したり、見上げ (仰瞰) したりした場合、水平線に対しては視線の俯仰角の影響は大きくないが、垂直線に対しては、垂直線の頂点の視距離と底点の視距離が大きく変化するため、見えの長さに対する影響は水平線の比ではないことが報告されている (von Collani, 1985; 安岡・石井, 2014; 小原・川合, 2021)。

そこで本研究では、垂直線あるいは水平線の単独提示において、観察者の俯瞰要因を排除するため、観察者の視線を水平にするとともに、刺激線分とは直交し、かつ線分の中心を維持した条件を確保した。

実験は、Holway & Boring (1941) の円盤を用いて行った大きさ-距離不変仮説実験を参考にした。すなわち、円盤の代わりに単独刺激の線分を用い、線分と観察者の距離を変化させることにより得られる見えの長さと距離の関係性を見出した。そして、二線、それぞれから得られた見えの長さ-距離関数から垂直線と水平線の異方性について検討することにした。

実験仮説は、先行研究とは反駁し、「両線で得られる見えの長さ-距離関数は類似し、どちらの方向にも異方性は生じない」とした。その根拠は、過大視を生じる第二の条件すなわち視線の俯仰角要因を排除したこと、さらに第三の条件すなわち、いずれの線分においても線分の中心と視線を一致させたため、十字図形を用いた実験条件に類似したことにある。十字図形においては、VHI が起こらないことが報告されている (Charras & Lupeñiz, 2009, 2010)。

第2節 方法

第1項 実験参加者

健康な 22 名の実験参加者（男性 8 名，女性 14 名； 21.3 ± 2.6 歳）が実験者の説明を受けた後，同意の上本実験に参加した。すべての実験参加者において課題遂行に影響を及ぼすような知覚運動機能や視覚機能の支障はなかった。また眼鏡やコンタクトレンズを常用している実験参加者にはそれらを着用させた。実験参加者は，これまで本実験に類する経験はなく，また本実験仮説についても事前に知らされなかった。なお，倫理に関する事項に関しては，帝塚山大学研究倫理委員会の承認（29-21）を得た。また実験中および事後においても，実験参加者に対する倫理的配慮を遵守した。

第2項 刺激と装置

Figure 21 (p.92)は実験の概略図である。外光の調整可能な実験室（ 12×6.0 m）を使用し，実験参加者が眼前はつねに 300 lx の明るさを維持した。Figure 21 中央 (p.92)には，水平条件での刺激図形 (A)と見えの長さの測定装置 (B)を示しており，Figure 21 左 (p.92)には，垂直条件での刺激図形 (A')と測定装置 (B')を示した。Figure 21 右 (p.92)のように，実験室の垂直な側壁面に床から高さ 1,250 mm に床面と水平に 800 mm 間隔に 1250 mm の柱を固定し，その上に 250 mm の間隔で二本のレール（長さ 4000 mm，幅 30 mm；スチール製）を平行に設置した。刺激を載せた台車は，観察者の眼前にある測定装置から 4000 mm の間を移動することができた (E)。なお測定装置の前面と観察者の眼前まではおよそ 30 mm であった。

見えの長さの測定装置 (B および B')の下にはレーザー距離計 (G; Bosch(株)製, Zamo 3603 F72 450, Malaysia)が刺激 (A および A')と測定装置 (B および B')までの距離を正確に測定しデジタル表示した。基準刺激となる線分は，長さ 50 mm 幅 8.0 mm の黒の壁紙で作成されアクリル板（ $50 \times 400 \times 10$ mm）にそれぞれ張り付けられた (A および A')。これらアクリル板は各条件で台車に容易に着脱ができた。線分の中央と測定装置 (B および B')のスリット (C)の中央とが水平になるように高さを調整した。このように刺激の背景にアクリル板を使うことによって，背景のフレーミング効果を最小限にとどめた (Kün-

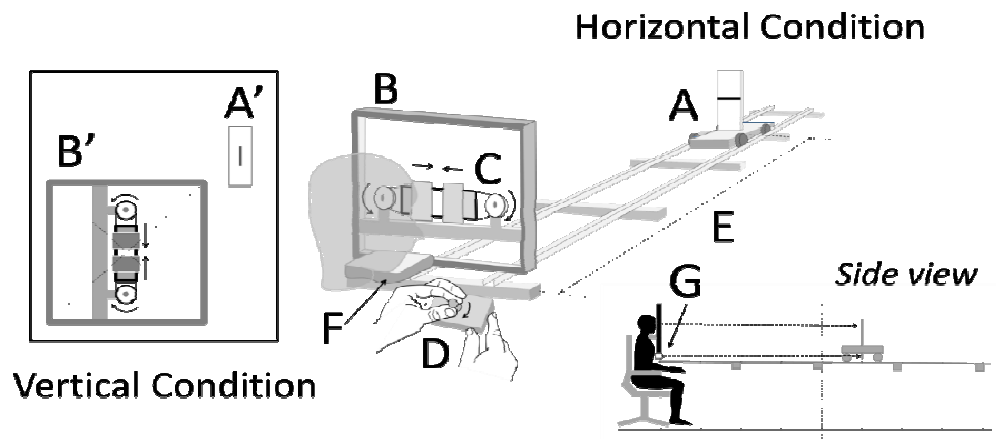


Figure 21 実験の模式図

図の中央には、水平条件での刺激図形 (A) と見えの長さの測定装置 (B) を例示し、図の左には、垂直条件でのそれぞれを示している (A' および B')。図の右には、側面図を示している。刺激を載せた台車は実験参加者の視軸と平行に 0 から 4000mm の間を移動することができた。レーザー距離計 (G) が刺激と測定装置 (B) までの距離を正確に測定した。刺激の線分 (50 mm : A および A') の中央と測定装置 (B および B') のスリット (C) の中央は水平に保たれた。実験参加者は、測定装置のスリット (C) に最大限接近し (< 10 mm) かつ中央に利き目の視軸がくるように、椅子および chin-rest (F) の高さを調整して腰かけた。実験課題では、様々な位置 (E: 0 ~ 4000 mm) から提示される刺激線分 (50 mm) に対して、実験参加者はコントローラ (D) を用いてスリット (C) の開閉を行い、見えの長さ (PSE) を決定した。スリットにはデジタルキャリパー (解像度: 0.1 mm) が連動し PSE を記録することができた。なお実験装置の周りは均質な色および高さのパーテーションで囲われ、明るさは常に 300 lx に調整された。

napas, 1955b, 1959)。また、図には示していないが、実験装置の周りは無地で同色のパーテーションで囲い、周囲の環境を一定に保った。

第3項 見えの長さの測定

見えの長さは、精密ノギスで測定できる装置を作成した (Figure 21)。装置は 90° 回転させ、水平線に対しては水平位で (Figure 21-B)、垂直線に対しては垂直位で (Figure 21-B') 測定することができた。実験参加者の眼前 (30 mm) で動くスリットはステップモ

ータが装着され、コントローラ (Figure 21-D; p.92)の左右の回転で左右 (上下)同時に開閉できるようにした。開閉のすき間は、連動したデジタルノギス (株式会社シンワ測定社製, 150 mm ホールド機能付, China)で 0.01 mm まで計測された。

第4項 実験手続き

実験についての説明を受けた後、実験参加者は実験参加の同意が求められた。次に、石津 (2011)の方法を用いて利き目が決定された。すなわち実験参加者は片手の拇指と指示指で輪を作り、その隙間から両眼で凝視した後、今度は単眼で凝視した左右のどちらの眼で遠景をとらえたかによって利き目が決定された。

実験参加者は実験用の椅子に着席し、まず (1)実験参加者の視軸の水平と、姿勢の安楽が維持できるように背もたれの角度が調節され、次に (2)足底が届き、実験参加者の視軸と刺激の中央が水平に保たれるよう椅子の高さと chin-rest の高さが調整された。最後に (3)眼球からスリットまでの距離 (30 mm)が維持される位置に、椅子および chin-rest の前後および左右の微調整が行われた。30 mm の間隔を設けたのは眼鏡者に対応するためだった (平均で 14 mm; 金子他, 2005)。また緩衝マットが貼られた chin-rest によって視距離および視軸が固定できただけでなく、実験参加者の疲労も軽減された。

実験課題は、測定装置の眼前の様々な距離 (0 ~ 4000 mm)に置かれた刺激線分がどのくらいの長さに見えるか、コントローラを用いてスリットを開閉し、見えの長さ (PSE)を調整することだった。実験開始前に練習試行が行われ、長さの調整が問題なくできるか確認された。1 試行は 10 秒から数十秒程度と短時間であるが、単調な繰り返し試行であるため、眼精および精神疲労等を配慮し、定期的な休息だけでなく実験参加者の要望に応じて数分の休息を入れた。一人当たりの実験時間は、70 ~ 120 分程度を要した。

第5項 実験計画

刺激は測定装置から 10, 50, 100, 500, 1000, 2000, 3000, 4000 mm の位置に置かれたため、観察者と刺激との視距離は、眼と測定装置の 30 mm を含めて、40, 80, 130, 530, 1030, 2030, 3030, 4030 mm の 8 水準だった。一方、向きは垂直線 (幅 8 mm, 高さ 50 mm)と水平線 (幅 8 mm, 横 50 mm)の 2 水準であり、結果視距離の要因 (8 水準)お

よび向き (2 水準)の二要因を実験変数とした。各条件につき 3 試行ずつ実施した。したがって、実験参加者の総試行数は 48 (8×2×3; 視距離×向き×試行数)試行となった。視距離は疑似ランダムに提示され、向き条件については実験参加者間でカウンターバランスがとられた。PSE は 100 分の 1 mm まで記録した。

第 6 項 分析方法

Excel 処理されたデータを IBM SPSS Statistics 27 (Windows 10)によって記述統計および統計処理を行った。各条件の試行数が少ないため、各条件 3 試行の中央値を実験参加者の PSE の代表値とした。実験参加者の調整した長さ (平均値)に対して対応のある×対応のある二要因分散分析 (8 視距離×2 向き)を実施した。統計の有意水準は 5% ($p < .05$)とした (竹原, 2013)。

第 3 節 結果

Table 6 (p.95)は各視距離および各向きで知覚された長さの平均値および標準偏差を示している。左列より距離 (distance, mm), 水平位での平均値および標準偏差, 垂直位での平均値および標準偏差である。右列は異方性の評価となる水平線に対する垂直線の比 (Vertical/horizontal)の平均値および標準偏差である。1 未満は見えの長さにおいて、垂直線の方が水平線よりも短いことを示している。得られた比は 0.73 から 0.99 の範囲で、いずれの距離においても、水平線の方が長く知覚され、また距離が長くなるほど水平線の方が、その差が増大する傾向が見られた。

対応のある二要因分散分析 (8 視距離×2 向き)の結果からは、視距離の主効果は有意であり、視距離が増大するほど小さくなった ($F(1.89, 39.78) = 1963.3, p < .001, \eta p^2 = .99$)。次に、向きの主効果も有意であった ($F(1.00, 21.00) = 9.57, p < .01, \eta p^2 = .31$)。多重比較の結果から、130 mm, 530 mm, 2030mm, 3030 mm, 4030 mm で、水平線の方が垂直線よりも有意に長く知覚されていた ($p < .05$)。最後に、視距離と向きの交互作用効果については有意ではなかった ($F(3.33, 69.83) = 1.13, p = .345, n.s., \eta p^2 = .05$)。

Table 6 (p.95)の結果をプロットするといずれの向きにおいても非直線的な減少を示す。距離条件に大きな開きがあるので、対数を取り、この見えの長さと距離の関係の異方性を

Table 6 視距離と向きによる見えの長さ (mm)と異方性比の平均と標準偏差

Distance mm	Horizontal		Vertical		Anisotropy for V/H	
	<i>Mean</i>	<i>S.D.</i>	<i>Mean</i>	<i>S.D.</i>	<i>Mean</i>	<i>S.D.</i>
	mm		mm			
40	38.24	2.20	37.93	3.75	0.99	0.08
80	20.03	3.17	19.87	3.93	0.99	0.13
130	10.53	3.01	9.14	3.30	0.87	0.22
530	5.32	2.35	4.45	2.28	0.85	0.40
1030	3.01	2.71	2.14	1.54	0.85	0.56
2030	1.80	1.37	1.25	0.86	0.89	0.59
3030	1.72	1.29	1.05	0.86	0.87	0.75
4030	1.65	1.15	0.88	0.65	0.73	0.78

より明確に捉えることにした。Figure 22 (p.96)は、距離および見えの長さを対数で表し、直線を回帰させた。Figure 22 (p.96)から明らかなように、いずれの距離において、水平線の方がむしろ垂直線よりも長く知覚され、その傾向は距離が遠のくほど、大きくなる傾向が見られた。広がる背景には、距離と見えは直線的ではなく、反比例することによると考えられる（松田, 1995; 大山, 2008）。

Figure 23 (p.96)に、見えの長さと距離の関係について実験参加者の典型例を示した。平均値からもわかるように、視距離を通じて、水平線の方が一貫して長くみえる実験参加者は16名で、そのうち9名の実験参加者では、平均値のプロフィールのように距離が遠のくにつれて、その差が大きくなる傾向を示した (No.14: Figure 23-A; p.96)。しかし7名の実験参加者では、その差がほぼ一定で両線は平行を示した (No. 4: Figure 23-B; p.96)。一方、実験参加者の内4名は水平線と垂直線の見えの長さが、距離に応じてほぼ一致した (No.19: Figure 23-C; p.96)。なお、実験参加者の内2名は、全般的に垂直線の方が、わずかに長く見えていた (No.8: Figure 23-D; p.96)。

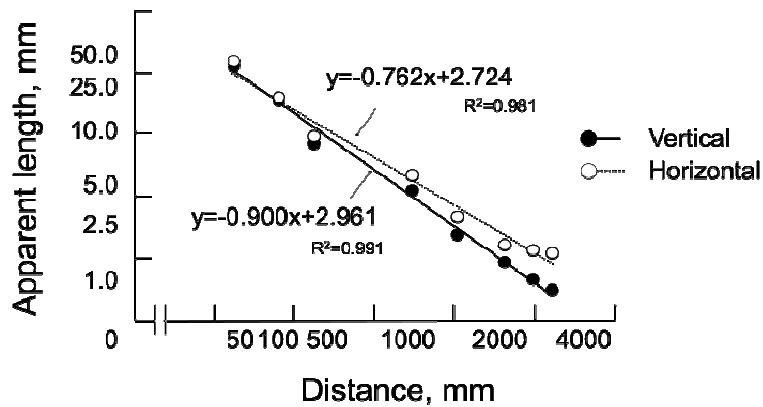


Figure 22 向きによる見えの長さと視距離の関係

視距離と見えの長さを対数グラフで示している。線形回帰は向き条件について適合している。垂直線の見かけの長さの平均値は黒丸，水平線の見かけの長さの平均値は白丸で示した。

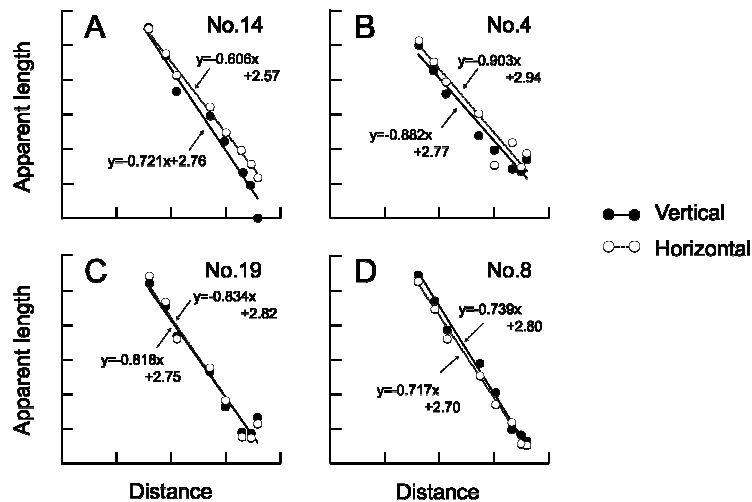


Figure 23 向きによる見えの長さと視距離の関係（個人差）

A, B ともに，水平線の方が垂直線より見えの長さが全ての視距離で大きくなっている。A では，同じ視距離における見えの長さの差は，視距離が長くなるほど大きくなるが，B では回帰直線はほぼ平行である。一方，D では，垂直線の見えの長さが水平線のそれよりも少し大きくなっている。

第4節 考察

VHI の異方性が、二線の相互作用を取り除いても固執するか検討するため、二線を単独に提示し、見えの長さとの関係から検討した。結果は、同じ距離にある同じ長さの線分は、水平方向に提示したほうが、垂直方向に提示するより有意に長く知覚された。この結果は全体の平均 (Figure 22; p.96)だけでなく、多くの実験参加者に当てはまった (16/22 名; Figure 23; p.96)。この知見は、十字図形 (同時対比)での VHI 特性 (Charras & Lupeñiz, 2009, 2010)に基づいて設定した「異方性は生じない」とした本実験の仮説にも、単独提示において垂直線の方が水平線よりも長く知覚されるとする先行研究の知見とも反駁した (McBride et al., 1987; Brosvic & Cohen, 1988)。

第1項 水平線はなぜ垂直線よりも長く知覚されるか

「同じ距離から提示された同じ長さの線分が、異なる長さに知覚された」本研究結果の解釈については、Holway & Boring (1941)の大きさ-距離不変仮説 (Size-distance invariance hypothesis)から考察するのが妥当であろう。彼らは、線分ではなく円盤を用いて、観察者との距離と見えの大きさの関係を検討した。彼らの実験では、距離を変化させる際に、距離に応じて円盤の大きさを変化させ、円盤の網膜像 (視野角)を一定にした。結果は、網膜像の大きさは一定にも関わらず、観察者の知覚する見えの大きさは、距離に比例して、実際の大きさに近似するよう増大した。つまり我々が知覚する対象の大きさは、観察者との物理的距離によって反比例的に変化する網膜像の大きさに直接的に依存していないことを示していた。

それでは、なぜ見えの大きさが距離に応じて変化したのかであるが、Holway & Boring (1941)は、さらに距離の手がかりとなる周囲の情報を観察者から制限した。すると情報を制限するほど、大きさと距離の比例関係は、実際の大きさから網膜像の大きさへ偏向した。この知見に基づき、彼らは、対象との距離は周囲の情報を手がかりに見積り、それに基づいて対象の見えの大きさを実際の大きさに近似させるという処理がなされていると結論した。彼らの仮説に従えば、同じ距離、同じ長さで提示した同じ網膜サイズに対する見えの長さが、二線で異なった本研究結果の原因は、垂直線と水平線が、異なる距離に位置すると知覚的に解釈されたからと考えざるを得ない。

次に、両線を異なる距離にあると知覚させた手がかりについてであるが、本実験では、いずれの距離にあっても固視点が線分の中央に維持されていたため、距離の手がかりとなるのは、周囲の変化よりも垂直線と水平線の向きの違いが貢献したと考えられる。さらに「水平線の方が、垂直線よりも長く知覚された」ことから、「水平線の方が、垂直線よりも遠くにある」と判断されたと考えるべきであろう (Woodworth, 1938; Gregory, 1963)。

そこで、なぜ「水平線の方が、垂直線よりも遠くにあると知覚された」のか、見えの距離に対する手がかりとその処理について考えてみる。Figure 24 (p.99)に、本実験で得られた「水平線の方が長く知覚される」という異方性の発生機序について模式的にまとめてみた。なお、実際の視野角度は水平位 (180°), 垂直位の消失点上側 (45°) および下側 (68°) で異なっており (山内・鮎川, 2001, p.33), 距離に対する量的影響は考慮する必要があるものの質的には影響を受けないと考え、ここでは簡略化した図に留めた。Figure 24-A (p.99) には水平線, Figure 24-B (p.99) には垂直線の処理を系統的にまとめた。また、図の左側に物理・光学的レベル, 中央に網膜レベル, 右側に知覚レベルでの線分の長さおよび距離に関する情報処理を示した。

まず、実験方法 (Figure 24 左; p.99)からは、同じ長さ (physical length)の垂直線と水平線は、同じ距離 (physical distance)から提示された。線分は、視軸の左右または上下に均等に広がるようにし、観察者の視線は、この中心に対して水平かつ垂直に観察した。この条件では、垂直線と水平線は同じ視角になるため、網膜レベル (Figure 24 中; p.99)において、同じ網膜サイズ (retinal length)として投影される (Holway & Boring, 1941)。また線分の中心は、観察者の視線、すなわち中心窩 (fovea centralis)と重なるため、消失点 (vanishing point)も線分の中心に知覚される。しかし、網膜レベルでは、線分の向きの違いによって、距離の手がかり (retinal distance)が異なってくることがわかる。すなわち水平線から観察者 (網膜の周縁)までの網膜距離の方が、垂直線のそれよりも長くなる。線遠近法仮説では、消失点 (Vanishing point)が、観察者から最も遠い点であり、消失点を中心に広がる同心円が大きいほど観察者に近いと知覚される (Woodworth, 1938; Gregory, 1963)。これは上下いずれの方向についてもいえる。したがって知覚される距離は、水平線の方が垂直線よりも「より遠く」あるいは垂直線の方が水平線よりも「より近く」にあると解釈され、網膜距離 (retinal distance)あるいはこれに基づく見えの距離 (apparent distance)が、網膜サイズに重みづけがなされ、見えの長さ (apparent length)が決定され、大きさの恒常性処理が成立するのではないかと考えた。

以上のように、消失点を含む水平線および垂直線は、対象と観察者との物理的距離を推測する上で、重要な距離情報を提供しており、消失点を通る網膜子午線上にある垂直線が距離スケールとして機能していることを提案する。

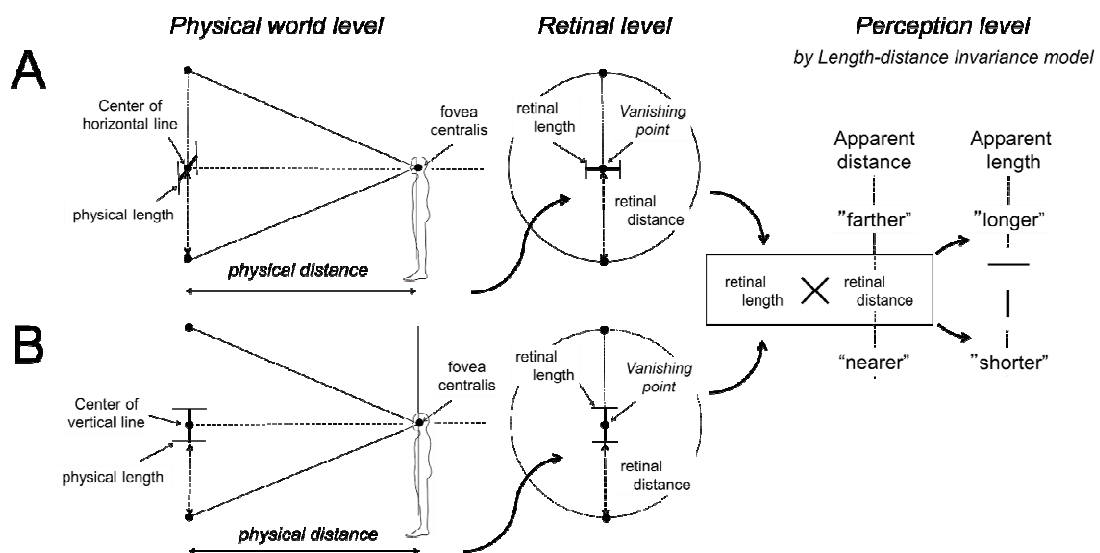


Figure 24 大きさ-距離不変仮説 (Holway & Boring, 1941)を用いた見えの長さに対する異方性の解釈モデル

物理的環境 (左列)において、同じ長さの直線が観察者から同じ距離に提示され、A では水平に、B では垂直に方向づけられ、観察者の視線はこれらの線に対して水平に、かつ直交するように保持される。したがって、網膜レベル (中央)では、視角が同じなので網膜での長さは同じになるはずであり、垂直線は水平線より半分下方に突出している分、網膜距離は短くなるはずである。この網膜距離の違いによって、見かけ上の距離が水平線より垂直線の方が近くなるように解釈され、処理されることになる。最後に、知覚レベル (右列)では、大きさ-距離不変仮説 (Holway & Boring, 1941)に基づき、見えの長さは網膜における長さで形成され、網膜距離は水平線が垂直線よりも長いと知覚される可能性がある。

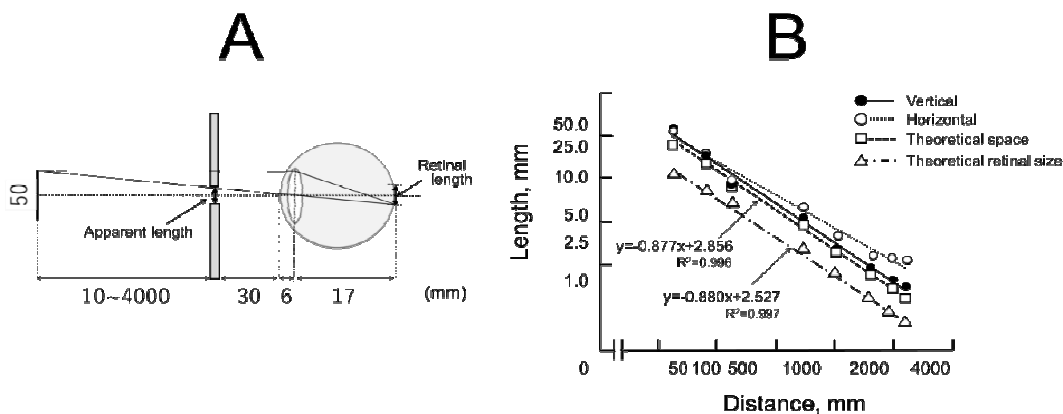


Figure 25 理論値からみた物理的距離との整合性

A は、観察者が見えの長さを調整するスリット上での理論値を求めるための光学モデルである。角膜から水晶体中心までの距離、水晶体中心から網膜までの距離、角膜の厚さはそれぞれ一般的な値を、刺激の長さ、刺激からスリットまでの距離、スリットから角膜までの隙間は本研究で用いた値をそれぞれ適用している。B は、垂直線 (●)、水平線 (○) については実測値を、スリットサイズ (□)、網膜サイズ (△) については理論値をそれぞれ示している。長さとの関係は両対数で示した。結果として、垂直線の方が水平線よりも距離に対して正しく反応していることを示唆している。

第2項 水平線が遠いのか、垂直線が近いのか？

上述のように、もし水平線の見えの距離と垂直線の見えの距離が異なるとしたならば、対象との実際の距離を決定するうえで、観察者はどちらの距離情報を活用しているのだろうか？

そこで、本実験で得られたデータを生物光学的な理論値と比較することにした。乾 (1993) のモデル (Figure 25-A) にヒトの標準的な数値および本実験で用いた刺激や観察距離を当てはめ、距離によって変化するスリットの長さ (apparent length) および網膜での対象の長さ (retinal length) を推定した (坂井・岡田, 2009; 産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター, 2014)。Figure 25-B に距離と長さの関係についての理論値と実測値を両対数で表した。理論値はスリット (見えの長さ) を□印、網膜サイズを△印で示し、実測値は垂直線を●印、水平線を○印で示している。結果、スリットでの理論値 (□) が垂直線で得られた見えの長さ (●) の関係によく当てはまった。

つまり、垂直線の見えの長さの方が物理的な距離に基づく長さに近似しており、水平線の方が実測値よりも過大に見えている可能性が示唆された。この結果は、全体の平均値から算出した見えの長さとの相関係数が、水平線 ($r = 0.762$) に比べて垂直線 ($r = 0.900$) の方が高いことから推察できる。結論として、消失点を通る垂直線は、対象との物理的な距離を推定するのに重要な役割を演じていることを提案する。

第3項 先行研究と反駁した理由

先述したように、単独提示による異方性を検討した先行研究は、本研究とは反対に、垂直線の方が水平線よりも長く知覚されていることを示す結果を得ていた。

しかし、これらの実験では、緒言に述べた幾何学的錯視図形を取り扱うときに必要な3つの統制条件が厳格に維持されていたか疑問が残る。論文では観察者がどのように描線したかについての詳細な手続きの記述はなく、特に視線の俯仰角の影響が排除されたかについては、唯一「刺激に対して正対するよう」(keep the stimuli squarely in front of subjects, p.936; McBride, et al., 1987)という記述があるのみであった。これでは机上の白紙に対して、俯瞰の影響を残したまま描画した可能性が排除できない。

このように観察者が平面の図形を上から見下ろ(俯瞰)した場合、水平線に対する視線の俯瞰の影響は大きくない。しかし、垂直線の場合、見えの長さへの影響は水平線の比ではないことが報告されてきた(von Collani, 1985; 安岡・石井, 2014; 小原・川合, 2021)。例えば、von Collani (1985)は、逆L字図形を用い、観察者の手前側に $+37.4^\circ$ と $+57.3^\circ$ に傾斜させ、水平線に対する垂直線のPSEを測定したが、図形と視軸が 90° の正対条件では垂直線の過大視は6.7%だったが $+37.4^\circ$ では3.4%の過大視、 $+57.3^\circ$ では逆に3.2%の過小視を報告した。安岡・石井(2014)は逆T字図形を用い、観察者の手前側 $+45^\circ$ から -45° の範囲で傾斜させ、 90° での垂直線の過大視(4.2%)に比べて、手前側 $15^\circ \sim 30^\circ$ では6.5~4.8%、奥側 $15^\circ \sim 45^\circ$ では6.9~7.1%と過大視の増大が報告された。小原・川合(2021)も、逆T字およびL字図形を用いて、観察者の矢状面に対して刺激図形を 90° から手前側へ 30° まで、 90° から奥側へ 165° まで 15° 間隔で傾斜させ、水平線に対する垂直線のPSEを測定した。結果、刺激図形を手前側(手前; $30^\circ \sim 75^\circ$)に傾斜したときに観測者が垂直方向の刺激図形を見下げる俯瞰条件(水平方向の刺激図形では見上げる仰瞰条件)では、ほとんどの条件で垂直線に過小視(L字: $-2.7 \sim -0.43\%$, 逆T字: -1.6

～ +0.71%)が見られた。一方、刺激図形を奥側（奥側； 105° ～ 165° ）に傾斜して観察者が垂直方向の刺激図形を見上げる仰瞰条件（水平方向たとえば机上の刺激図形では見下げる俯瞰条件）では、垂直線に過大視（L字：+0.71～ +1.79%，逆T字：+1.52～ +3.16%）が見られた。興味深いのは、傾斜角度が同じでも、回転軸の方向によって錯視の方向が変化したことにある。つまり垂直線が観察者から遠のく方へ倒れると過大視が増大し、近づく方へ倒れると過小視が増大した。

これらの知見を、McBride et al. (1987)および Brosvic & Cohen (1988)に当てはめると、例えば観察者が水平方向の机上の刺激図形を 45° から俯瞰すると、垂直線に対する過大視は、垂直（ 90° ）の条件に比べて、17%（L字）から 20%（逆T字）も増大することになる。McBride et al. (1987)の実験で得られた両図形の錯視（逆T字：15%，L字：11%）は、先行研究（Finger & Spelt, 1947; Künnapas, 1955a; Avery & Day, 1969; Thompson & Schiffman, 1974）に比較して約 2 倍を呈しており、彼ら自身もそれを認めている。しかし、その理由については、手続き、図形の大きさ、評価法にあるとしており（p.937）、俯瞰の影響については言及していない。このように机の上に置かれた白紙に描画する課題では、机の上に乗り出してでも、真上から 90° に見ながら描写する必要がある。

本研究では、観察者の俯仰瞰による影響を取り除き、垂直線分も水平線分も中点に対して、観察者の水平位の視線が当たるようにした。結果は、先行研究とは反駁し、水平線の方が垂直線よりも長く知覚されていることが明らかになった。それゆえ、先行研究において単独提示で見られた垂直線の過大視は、「網膜由来の異方性」ではなく、線分描写時に生じた観察者の「俯仰瞰など他の要因由来」によって生じた可能性が高いと結論した。

第4項 VHI 図形では、なぜ垂直線に過大視が生じるのか

実験結果から垂直線と水平線の「見えの長さ」に観察される異方性は、大きさ・距離不変仮説（Holway & Boring, 1941）に従って、二線に対する見えの距離が異なることによって生じることを提案した。しかし、VHI では、「垂直線の見えの長さの方が、水平線のそれよりも長い」というのが一般的現象であり、本実験結果とは真っ向から対立した。

それゆえ、先行研究の知見との整合性を崩すことなく、かつ「見えの距離」が VHI の発生の原因として説明できるか試みることにした。その際、少なくとも、消失点を通る垂直線で観察される以下の3つの現象が、1つの枠組みで説明できることが重要と考えられる。

すなわち、(1)単独提示では、見えの長さが水平線 > 垂直線となること、(2)十字図形の同時対比では、見えの長さが垂直線と水平線が等しくなること (Charras & Lupeñiz, 2009, 2010)、(3)同時対比の逆 T 字図形および T 字図形では、見えの長さが垂直線 > 水平線となることが説明できなければならない。

Figure 26 (p.104)は、各線分における見えの距離 (網膜レベル)と見えの長さの関係と、その異方性の現れ方を概念的に示している。縦軸に見えの長さ、横軸に見えの距離を表し、その根拠となる網膜距離について消失点 (右端)と網膜周縁 (左端)を示した。見えの長さの大小関係が、現象 (1)と現象 (3)で逆転することから、水平線と垂直線の長さ-距離不変関数に異なる傾斜をもたせた。その背景として見えの長さの処理において、視野角度の広い水平方向 (180°)の方が、垂直方向 (113°)よりも距離の変化の影響を大きく受けるので、水平線の傾きを大きくした (山内・鮎川, 2001)。

Figure 26-a (p.104)および Figure 26-b (p.104)は、単独提示で見られた現象 (1)を示している。本実験結果に基づき、消失点上にある水平線の見えの長さ (Figure 26-a; p.104)の方が、消失点より手前側に位置すると判断される垂直線 (Figure 26-b; p.104)の見えの長さよりも長く知覚される。Figure 26-c (p.104)は二線の同時対比で、垂直線の脚が消失点よりも少し下側へ伸びた例を示している。距離の推定は垂直線が基準となることから (Figure 25; p.100)、水平線の見えの長さは、垂直線の見えの距離に依存して決定されるので、この範囲では見えの長さは垂直線のそれよりも長く知覚される。

Figure 26-d (p.104)は、十字図形 (d)をした二線の同時対比 (現象 2)を示している。消失点および垂直線の足の位置は、単独提示の垂直線 (Figure 26-b; p.104)と同様であるため、垂直線の見えの長さは Figure 26-b (p.104)と等しい。一方、水平線に対する見えの距離は垂直線のそれに従うので、単独提示のときよりも手前側に移動する。そのため、見えの長さはより短くなり、結果、二線で等しくなり、十字図形では異方性が消失すると考えた (Charras & Lupiñez, 2009, 2010)。

Figure 26-e (p.104)では、垂直線の脚がさらに下方に延び、より手前側にあると判断される。ここでは、二線の関数の傾きが逆転し、見えの距離が等しい場合、垂直線の見えの長さの方が水平線のそれよりも長くなる。Figure 26-f (p.104)の T 字図形では、さらに垂直線の脚が網膜周縁に近づき、見えの長さの異方性は大きくなる。

このように消失点を通る垂直線が、見えの距離を決定し、それに基づいて線分の見えの長さを決定するという新たなモデルを考案したが、今後はこのモデルの検証のために以下

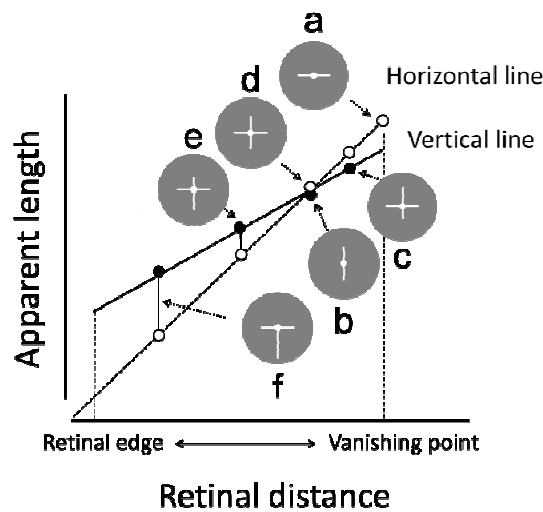


Figure 26 見えの距離によって引き起こされる異方性の概念図

長さ・距離不変関数がそれぞれの線に対して個別に用いられ、その傾きは水平線よりも垂直線の方が緩やかである。これにより、VHI で観察される 3 つの重要な現象を一つのフレームで矛盾なく解釈することが可能となる。すなわち、1 本の線を水平 (a) または垂直 (b) に同じ物理的距離で提示する単一提示では、水平線 (a) の方が垂直線 (b) よりも見かけ上の距離が遠く感じられるため、水平線の方が長く知覚される。同時提示の場合では、2 本の直線が同じ物理的距離に提示されるが、2 等分する性質に若干の違いがある。交差図 (c) では、垂直線の見かけの距離は b と同じとなり、水平線の見えの長さの判断にも使われる。その結果、十字図では 2 つの見えの長さが同じ長さとなる。2 等分図 (e) や T 字図形 (f) のように水平線よりも下に垂直線が伸びた場合は、網膜の端まで伸びることになるため、物体と観察者の距離が近くなるほど、垂直線が長く知覚される。交差図 (d) 以降では、長さ・距離不変関数の傾きが逆になっているため、垂直線はむしろ水平線より長く知覚される。この概念モデルは、仰瞰において、逆 T 字のように垂直線が上方に伸びている場合にも当てはまる。

の課題について検討することになっている。すなわち、(1)消失点を通る垂直線には距離の手がかりが上下に生じるが、これらはどのように見えの距離に貢献するのか、(2)垂直線および水平線の長さ・距離不変関数の傾きは実際に異なるのか否か、異なるとすれば、それは垂直方向および水平方向の視野角に関連しているのか、(3)L 字図形のように消失点を通らない垂直線は、見えの距離の決定に貢献しているのか否かである (小原・川合, 2020a)。

第6章 総合考察

第1節 研究の振り返り

Wundt や Weber が実験心理学を始めて以来、人間に生じる錯視・錯覚は「物理学的法則に当てはまらない、人間の間違った現象」として扱われ、精神物理学が確立されても「驚き」の対象ではあったものの、その背後にあるメカニズムについては推測の域に留まり、本格的な追求はなされてこなかった。しかし、認知科学・認知心理学が市民権を得た現在、錯視・錯覚は「生物学的法則に基づく情報処理の結果」、つまり、錯視・錯覚こそが人間の情報処理の本質であるという視点に180度、転換したのである。以後、脳科学、人間工学、ロボット工学、医学など様々な領域において、錯視・錯覚をブレークスルーとした人間の情報処理解明が盛んになってきたといえる。

本研究においても、錯視に対する人間の見えを手がかりに、人間の視覚情報のメカニズムにアプローチを試みた。筆者の関心がロボットの視覚・運動系にあり、空間認知が運動の制御に重要な要素であったことから、「外界三次元空間の視知覚」、中でも「三→二→三次元問題」に焦点をあてた(石井, 2006)。この「三→二→三次元問題」とは、人間では外界の三次元情報は、一旦二次元で構成される網膜像に落とし込まれるため、脳内の空間処理機構において三次元に再構築しなければならないというジレンマである。この意味は、観察者の網膜では、垂直(冠状)軸および水平軸は外界情報の次元性が保たれるが、前後(奥行・矢状)軸については写真のように平面に落としこまれるため、前後軸の再構築には、高度で複雑な処理がなされていると考えられる。

この問題の解決の手がかりを得るために、座標軸の再構築に感受性が高い直線で構成される幾何学的錯視を刺激として選択し、その中でも、垂直軸と水平軸のみで構成されるVHI (Fick, 1851)に絞ることにした。前後軸の処理過程には、斜線を含む錯視図形を用いたいところであるが、斜線には、前後軸だけでなく、どこから眺めているかといった俯仰瞰情報、どれだけ傾いているかといった傾斜情報も含むと予想されたため、二次元平面の二軸に置かれた線分に対する、人間の見えを研究対象にすることにした。

このような問題提起と研究の方向性を決定し、序論では、視空間知覚解明の手がかりをVHIに関する文献調査から探索し、手がかりを抽出した。次に、《第一研究》として、序論で得られた手がかりで要因計画に基づく実験を実施し、人間の見え(錯視量)を指標とし

て、背後にある視空間知覚機構を考察した。

第2節 文献調査から抽出された課題

150 年以上に渡り輩出されてきた VHI に関する文献を、刺激や実験環境など属する要因（物理的要因）と観察の方法や個人差など観察者に属する要因（観察者要因）の観点から整理、探索し、視空間知覚解明に有用な手がかりを抽出した。

その結果、VHI において、時代や方法論を超えコンセンサスが得られ、限りなく一般的法則といえるものは、以下の三つの現象であった。すなわち、同一平面上に描かれた同じ長さの垂直線と水平線が、観察者が刺激図形と平行に（視軸を直交させて）観察した場合は、(1)逆 T 字または T 字に配置された図形の垂直線は過大視され、水平線よりも 10%程度短く知覚される、(2)L 字または逆 L 字に配置された図形の垂直線は過大視され、水平線よりも 3%程度短く知覚される、(3)十字型に配置された図形の垂直線と水平線は等しい長さに知覚され VHI の錯視現象が消失する、であった。

一方、VHI の現象を明確化するために、より詳細な検証が必要と認められた手がかりとして、(1)接点位置、(2)単眼・両眼視、(3)実験室の明暗、(4)観察者の俯仰瞰角度、(5)大きさ、(6)背景、(7)中心視・周辺視、(8)姿勢、(9)性別の 9 要因を見出した。これらは、VHI の発生機序およびその背景にある視空間知覚機構解明の手がかりとして重要であるが、先行研究において、組織的な検討が行われていなかったり、得られた結果やその解釈を巡って意見が対立したり、コンセンサスが得られておらず組織的な検証が必要と判断した。

第3節 課題の検証と成果

文献調査で抽出された 9 つの要因の中から特に検証が必要と考えられた 4 つの要因（1～4）に加え、異なる刺激を 1 つの枠組みで検証する必要があるため図形の向き（視点の変化；基準のエラー効果）の要因と線分同士（線による分割）の影響を検討する分割要因を合わせた 6 つの要因に対して、4 つの追試実験を行い、VHI について明確化された知見は以下のとおりである。

すなわち「第一研究」では、VHI に対する「接点位置、向きおよび単眼・両眼視の影響」

の3要因について組織的な検証を行った。35名の実験参加者を対象に、背景要因を排除した暗室において、PC上にVHI図形を提示し、基準となる水平線(50 mm)の長さと等しくなるように垂直線を調整させた。7×4×3(接点位置×向き×観察方法)条件で2試行、計168試行が各実験参加者に実施され、各条件で得られた平均のPSEから、各要因が錯視に及ぼす影響を分析した。

結果、接点位置と錯視との関係については、水平線の中点で垂直線の過大視が最大となり、端点で若干の過大視となり多くの先行研究で報告された知見を支持した。しかし、中点から端点の間は過小視が見られ、全体としてM字型を呈した。それゆえもっとも支持されていた、中点を底とするV字型(Künnapas, 1955a; Charras & Lupiáñez, 2009, 2010)およびイチョウ型(Wolfe et al, 2005)の知見を排除し、これまでMarma et al. (2015)が単独で主張していたM字型を支持した。次に、図形の向きを変化させても、接点位置の変化によるM字型のプロフィールは一貫して見られ、これはVHIの特性として見出された新たな知見といえる。

さらに、向きと錯視量の関係からは、基準のエラー効果(effect of standard error)が顕著に見られた。すなわち、逆T字・T字において水平位にある水平線を基準にすると垂直位にある垂直線には5%程度の過大視が、左右に回転させた図形(└・┘)において垂直位にある水平線を基準にすると水平位にある垂直線には10%程度の過小視が見られた。このことは垂直バイアスが、基準線にかかる方が、比較線にかかるよりも得られる錯視量が有意に強くなることを示唆していた。このことから、垂直線が基準のときの方が、効果が強くなるとするGardner & Long (1960)およびBegelman & Steinfeld (1971)の知見を支持し、どちらの線分を基準にしても比較線に過大視が生じるとするBegelman & Steinfeld (1967)の知見を排除した。ただし、今回は調整法で行ったため、調整法では有意な基準線のエラー効果が見られ、階段法では認められないとするAvery (1970)の知見は確認することはできなかった。このように、向きの影響から、基準線のエラー効果が錯視量に決定的な影響を及ぼすことが明らかになり、基準線を統制することが、錯視量の質と量の精度を上げ、VHIの視知覚機構解明につながるという、今後の研究に有用な知見を提供した(小原・川合, 2020a)。

最後に、単眼視と両眼視と錯視の関係について、両条件でM字型が保持されることについては新たな知見である。そして、錯視量の質および量的には両条件において有意な差異は認められなかったため、錯視の現れ方に有意な差異がないとするKünnapas (1957c)の

主張を支持し、差異があるとする Valentine (1912a)の知見を排除した。また、その後の追試分析によって、右単眼の方が左単眼よりも錯視が強いとする報告 (Vette, 1964), 効き目単眼で錯視が減弱されるという Prinzmetal & Gettleman (1993) の知見も排除できた。

《第二研究》では、VHI に対する「明所視・薄明視・暗所視」といった明暗の要因について組織的な検証を行った。28 名の実験参加者を対象に、暗所視 ($< 1.0 \text{ lx}$)・薄明視 (10 lx)・明所視 (20 lx $<$)に照度を制御した実験室において、PC 上に VHI 図形を提示し、基準となる水平線 (50 mm)の長さと同しくなるように垂直線を調整させた。 7×5 (照度 \times 接点位置)条件で 6 試行、計 210 試行が各実験参加者に実施され、各条件で得られた平均の PSE から、各要因が錯視に及ぼす影響を分析した。

結果、暗所視 ($< 1.0 \text{ lx}$)の方が、薄明視 (10 lx)や明所視 (20 lx $<$)よりも有意に減弱した。興味深いことに、錯視の強さについては、暗所における順応時間が短かった ($8 \sim 12 \text{ min.}$)本研究 (第二研究)に比べて、十分に順応させた ($45 \sim 60 \text{ min.}$)先行研究 (第一研究)での結果の方が錯視はさらに減弱していた。

結論として、暗所視の方が錯視の減弱が見られるとする Künnapas (1957b)の知見を支持し、照度には影響を受けないとする Avery & Day (1969)の報告を退けた。また、第一・第二研究と同様に、接点位置による M 字型の変化は明暗の程度に関わらず一貫して現れた。このことは Künnapas (1955a)が報告した V 字型の結果は明暗によるものではないこと、また M 字型は照度に影響を受けない普遍的な現象であることが新たな知見として示された (小原・川合, 2020a)。

《第三研究》では、VHI に対する「観察者の視線の俯仰角要因」について、組織的な検証をおこなった。23 名の実験参加者を対象に、基準となる水平線 (50 mm)の長さと同しくなるように垂直線を調整させた。その際、刺激図形が提示される PC 画面は水平線を回転軸として、実験参加者の矢状面に対して 15° ずつ傾斜された。実験参加者の視軸と垂直の面を 90° として、実験参加者側 (仰瞰条件)に 4 水準、遠ざかる方向 (俯瞰条件)に 5 水準で傾斜させた。 10×5 (傾斜角度 \times 接点位置)条件で 4 試行、計 200 試行が各実験参加者に実施され、各条件で得られた平均の PSE から、各要因が錯視に及ぼす影響を分析した。

結果は、見えの長さに対する俯仰瞰角度は有意な主効果を示し、かつ錯視量変化は俯瞰条件と仰瞰条件との間で非対称性を示した。特に逆 T 字や L 字図形では、俯瞰角度が大きくなる (実験参加者側へ垂直線が倒れる)ほど垂直線には過小視が生じ、反対に俯瞰角度が大きくなる (実験参加者から遠ざかる方へ垂直線が倒れる)ほど過大視が生じた。これにつ

いては、これまで断片的な報告 (von Collani, 1985b; 安岡・石井, 2014)に留まっており、矢状面を包括されたデータは本研究が初めてである (小原・川合, 2021)。また、第一・第二研究同様に接点位置による錯視量変化は M 字型を示していた。

考察においては、俯仰角度で生じる非対称性は、VHI に由来するものではなく、観察者の視軸と錯視図形平面に生じる傾斜によって生じる物理光学的法則に起因するとした。

先行研究には、恣意的に刺激図形に傾斜をつけたり、観察者の視線と図形との直交が厳密に保持できていなかった条件 (Chapanis & Mankin, 1967; McBride et al., 1987; Brosvic & Cohen, 1988)で得られた VHI の錯視量には、致命的な俯仰角バイアスが付加されており、今後の VHI 研究において排除すべき要因として主張した (小原・川合, 2021)。その一方で、非対称性の情報が、観察者の俯仰瞰知覚、すなわち「どこから見下ろしているか」あるいは「どこから見上げているか」といった情報になり得ることも提案した。

《第四研究》では、「分割要因」について組織的な検証を行った。分割要因は、逆 T 字図形が L 字図形よりも垂直線の過大視が顕著に現れる原因の解釈として、また十字型図形で錯視が消失する原因の解釈として、広く支持されてきた (Oppel, 1855; Künnapas, 1955a, Suto, 1960; Girgus & Coren, 1975; Wolfe et al., 2005; Charras & Lupiáñez, 2009, 2010; Hamburger & Hunsen, 2010; Mamassian, & de Montalembert, 2010; Mikellidou & Thompson, 2013)。

しかし、その一方で、それを裏付けるための接点位置と錯視量との関係については、V 字型 (Künnapas, 1955a; Charras & Lupiáñez, 2009, 2010)、イチョウ型 (Wolfe et al, 2005)、M 字型 (Marma et al., 2015)と、分割の程度と錯視量に組織的で、一貫した関係性を見出せないのが現状である。そこで、原点にもどり、VHI に生じる異方性が「分割」という二線の相互的な影響を取り除いてもなお生じるのか、あるいは減弱するのか検討することにした。22 名の実験参加者を対象に、一定の長さの線分 (50×5 mm)を、垂直方向あるいは水平方向のいずれか単独に提示し、かつ視距離を実験参加者の眼前 40 ~ 4030 mm (8 水準)の間で変化させた。基準となる線分は、水平のルール上を移動し、その中点は chin-rest で固定された実験参加者の視線と常に水平を維持することができた。実験参加者は、眼前の開閉式スリットを調整して、各距離および各向きに設置された線分の見えの長さと等しくなるようスリットを調整した。8×2 (視距離×向き)条件で 3 試行、計 48 試行が各実験参加者に実施され、各条件で得られた平均の PSE から、各要因が見えの長さに及ぼす影響を分析した。

結果は、距離と向きの主効果はいずれも有意で、交互作用効果は認められなかった。興味深いことに、VHI の一般的現象に反し、同じ距離に提示された同じ長さの線分に対する見えの長さは、垂直線よりも水平線の方がむしろ有意に長く知覚された。この結果は、独立して線分を描くという課題で、垂直線に有意な過大視を見出し、単独提示で VHI を確認したとする先行研究と対立したが (McBride et al., 1987; Brosvic & Cohen, 1988)、観察者の俯仰瞰要因にバイアスとの関係から考察した (小原・川合, 2021)。

さらに、見えの長さと距離の関係を調べたところ、二線が異なる勾配をもっていることが見出された。それゆえ、二線の見えの長さの違いは、二線に対して知覚される距離の違いから生じると解釈し、大きさ-距離不変仮説 (Holway & Boring, 1941) を支持した。つまり、同じ距離にある線分は、垂直線よりも水平線が観察者から遠いところにあると重みづけ (大きさの恒常性) 処理がなされ、結果、水平線の方が、垂直線よりも長くみえるとした。

最後に、この仮説に従って、VHI 図形のように二線を含む図形においても考察した。ここでは、二線を含む図形と観察者との距離の基準は、垂直線によって決定されると仮定した。そのことが水平線の見えの長さにも影響を及ぼすことで、逆 T 字や T 字図形では、垂直線に過大視が生じたり、十字図形では異方性が消失したりすると解釈した。

第 4 節 成果から視知覚機構を考える

ここでは、《第一研究》から《第四研究》によって得られた知見が、垂直線と水平線に生じる異方性の背景にある視知覚機構解明にどのように関連づけることができるか考察してみる。

第 1 項 異方性は単眼レベルで生じている

《第一研究》からは、先行研究から得られた一般性・普遍性のある 3 つの現象 (第 2 節) のうち、(1) 逆 T 字および T 字図形において垂直線が過大視されること、(2) 逆 T 字図形の方が、L 字図形よりも過大視の量が多いこと、の二つの現象が確認された。このことは、我々の視空間知覚の処理機構において、垂直線の方が水平線よりも相対的に長く知覚されるという「異方性 (anisotropy)」の存在を再確認するものであった。

この異方性は、「向き」の実験からも確認され、水平線を基準にした時には垂直線に「過

大視（水平線の長さよりもより短く知覚する）」が、垂直線を基準にした時には水平線に「過小視（垂直線の長さよりもより長く知覚する）」が生じた。さらに、この異方性は、「単眼・両眼視」のいずれの実験からも得られた。

以上のことから、我々の視空間処理は、物理世界の正方形（等尺）の座標系に対して、重力線（網膜子午線）方向に「相対的に 3% から 10% 程度の縦長の座標系」に基づいて行われており、この処理は単眼のレベルで生じていることから、網膜処理の初期段階の事象であると推察された。これについて Julesz (1971) も、VHI 図形は単眼視レベルで結像処理がなされる一方、両眼視で起こる輻輳や立体視などは影響しないと主張している。

第2項 異方性と奥行処理

水平線上の接点位置とその上に立つ垂直線の見えの長さの関係が、V 字型であるか M 字型であるかは、VHI の発生が分割によるものか決定するだけでなく、三→二→三次元問題（石井, 2006）、すなわち「二次元で表現される網膜像から、どのように奥行（前後）情報をひきだすか」についての処理の解明にも極めて重要な手がかりになる。

この意味では、多くの研究者が支持する V 字型の方が三→二→三次元問題（石井, 2006）の解決には、都合がよい。なぜなら網膜像の構造や機能との整合性が高く、奥行知覚の再構築が容易に説明できるからである。例えば、川合（2010）は、V 字型に基づき「同心円

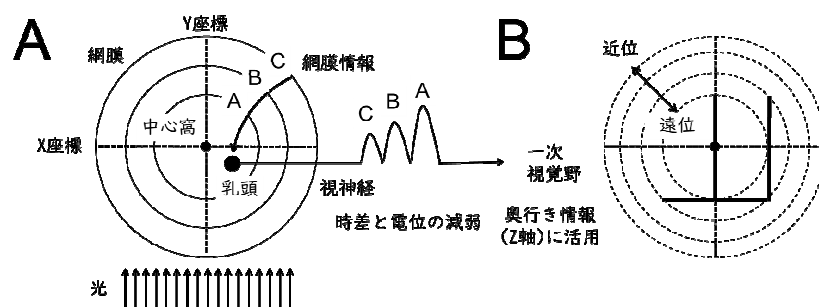


Figure 27 網膜像の奥行処理 (A)と VHI の出現 (B) (川合 (2010)の理論を筆者が作図)

(A)外界からの A~C の三点は、網膜上に同時に投影されるが、一次視覚野へ伝達される場合は、乳頭に近い A から伝達が生じ、三点に時差と電位の強弱が生じる。(B)同じ長さの線分でも、中心視野に提示された方が周辺視野に提示されるより、電位が強く、より大きく知覚される（大きさの恒常性）。

仮説」を提案し、二次元平面から奥行情報を生じる簡単なモデルで説明している (Figure 27; p.111)。

このモデルでは、線遠近法を背景に、消失点の生じる網膜の中心窩を最遠点として、中心視野から周辺視野に奥行座標が形成されるというものである (Figure 27-A; p.111)。そして、この奥行知覚を引き起こす脳内機構は、網膜中心付近の情報と網膜周辺の情報が一次視覚野に伝達される局面において、視神経で生じる両者の時差と電位の減弱によるとするものである。この奥行情報に基づいて大きさの恒常性が担保され、遠い (中心に映る) 対象ほどより大きく知覚されるのである。

要するに、同じタイミングで網膜に到達した光情報ではあるが、視神経という有線を通して情報が伝達される際に、中心視野と周辺視野の処理において時差や電位の減弱が生じ、それが奥行や大きさの恒常性を誘発するというものである。そして VHI 図形 (Figure 27-B; p.111) もこの法則に基づいて中心視ほど過大視が強く、周辺に向かうほど過大視が減弱するというのである。図からもわかるように逆 T 字図形の垂直線は中心視野にあり、水

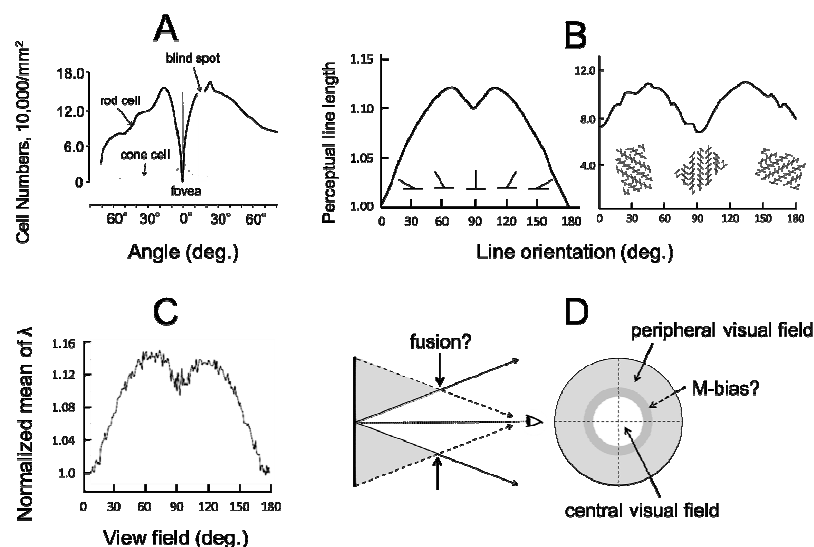


Figure 28 M 字型特性の背後にある視覚機構の候補

A は中心窩を中心に周囲へ広がる杆体細胞 (rod cell) の分布に見られる M 字型特性 (Pirenne, 1967), B は垂直線 (Wolfe et al., 2005) およびツェルナー図形 (盛永, 1933) を平面上に回転させたときに錯視量に生じる M 字型特性, C は自然環境から体験する確率を加えたときにバイアスに生じる M 字型特性 (Howe & Purves, 2002), D は中心視野と周辺視野の融合部に生じる可能性のある M 字型特性。

平線よりも長く知覚される。一方、L 字図形の垂直線と水平線は中心から等距離にあり長さがほぼ等しく知覚されるので、VHI の説明もできる。

しかし、本研究で見出された新たな知見では、これまで支持されてきた単純な V 字型ではなく、M 字型であることが明らかになった。このことは、単純に異方性と奥行処理を結びつけることができないことを示唆しており、中心視野と周辺視野との間（概ね 30° 付近）に、より複雑な神経機構あるいはバイアスの関与を考える必要性を示した。

現在のところ、M 字型の知覚を誘発させる脳内機構として考えられるものを図に示した。まず、解剖学的視点からは、《第三研究》の明暗実験から、影響の可能性が推察された杆体細胞の分布特性 (Figure 28-A; p.112; Pirenne, 1967) である (小原・川合, 2020b)。杆体細胞は、中心窩の左右 30° にかけて密集しておりそのような特性が M 字型を反映した可能性がある。次に、線分の傾斜と見えの長さの関係を検討した研究 (Figure 28-B; p.112) から、M 字型特性を示唆する報告がある。Wolfe et al. (2005) は、逆 T 字図形の垂直線を左右に傾斜をつけて錯視量を測定したが傾斜が 30° 前後で過大視が最大になると報告している。また盛永 (1933) はツェルナー図形を用いて主線の傾きと錯視量の関係を測定したが、傾斜の 45° 前後で錯視量が最大になることを報告している。この解釈としては、垂直線と水平線の間では、垂直線に感受性を持つ視細胞と水平線に感受性をもつ視細胞のいずれもが反応するためではないかという説がある。また、三次元世界の見えと体験との確率論的な相互作用で生じるバイアスにも M 字型特性が見られる (Figure 28-C; p.112)。網膜上には同じ長さに映る線分でも、飛び込んでくる角度の影響を受けるため、実世界で経験する本当の長さへの修正が、出現確率 (Range image statistics; Howe & Purves, 2002, 2005) に基づいてなされるが、その重みづけが M 字型となって表れている。これは環境生態学的な発想で、我々の二次元網膜に映る三次元世界の見えと、本当の三次元空間を近づけるために、三次元環境から体験できる実際 (フィードバック) 情報の確率的な変数 (経験値) を介入させるというスタンスと考えられる。他に Affine transformation (Westheimer, 2008), Laplacian-of-Gaussian kernel (Craven & Watt, 1989; Buddeley & Hancock, 1991; Craven, 1993) など興味深いモデルが提案されている。これ以外にも、Figure 28-D (p.112) に示した中心視野と周辺視野の統合において、両視野の情報の接合部でバイアスが生じている可能性も考えられる。あるいは、両眼の視覚情報の統合において、両眼の情報の重なり合いにおいてバイアスが生じている可能性もあるが、これについては、《第一研究》において、単眼でも M 字型のバイアスが生じるため否定できる可能性がある。この M 字型

に広がる視空間知覚の背景因子の特定については、今後の課題としたい。

第3項 異方性の発現の新たな解釈の提案

《第四研究》では、線分を単独提示して距離を変化させると、垂直線と水平線では、見えの長さや距離の勾配が異なることを新たに発見した。このことは、物理的に同じ長さの距離から、同じ長さの線分を提示し、光学的に同じ長さとして網膜に届いたとしても、その後の処理によって、知覚される見えの長さが、水平線と垂直線では異なってくることを意味していた。

そして「その後の処理」についての解釈は、今回見出された「距離勾配の差異」に関する知見から「分割されたから」ではなく、Holway & Boring (1941)の「大きさ-距離不変仮説」が有力となった。なぜなら、彼らの説では、物体の見えの大きさが距離に反比例して知覚されないのは、見えの距離に基づいて「大きさの恒常性」処理が働いているとするからである。これに基づいて、距離の決定処理において、物理的には同じ距離に提示した垂直線は手前側に、水平線は、より遠くにあるという重みづけ（大きさの恒常性）がなされ、結果、垂直線の見えの長さよりも、水平線のそれの方が長く知覚されると解釈した。

このように本研究結果は、異方性への垂直線の関与が、従来の「分割」ではなく、「距離の決定」に貢献する可能性を示したものと見える。「距離の決定」とは、我々の知覚する「奥行感」のことであり、従来から「線遠近法」と呼ばれる奥行知覚の手がかりの1つである。従来は、消失点（固視点）を通る例として、斜線がその役割として挙げられてきたが、今回の実験からは、消失点を通る垂直線や水平線も「距離の決定」すなわち「遠近法」に関与している可能性が示唆された。

考察では、これら仮説を当てはめて、VHI図形のような二線を含む図形での異方性に言及した。すなわち、単独提示とは異なり、水平線は同時に提示された垂直線によって距離が決定され、その距離に基づいて見えの長さが決定されるというものである。そして、このモデルに基づいて、逆T字、T字図形、十字図形における垂直線および水平線の見えの長さの変化を説明した。

なお、垂直線と水平線で、長さ-距離不変関数の勾配に差異ができる背景は、視覚情報の処理範囲の問題により垂直軸における視野（ 120° ～ 135° ）と水平軸における視野（ 180° ～ 200° ）の違いが有力であり、今後、このような視点から検討を続けていきたいと

考えている。

第4項 異方性の解明に致命的な俯仰瞰要因

VHI で生じる異方性およびその背後にある視覚における前後軸（奥行）の再構築処理の解明を目指す本研究にとって、《第三研究》における観察者の俯仰瞰要因は排除すべきバイアスの研究ととらえることができる。つまり、観察者が平面図形をどこからみるかは、VHI とは全く関係のないことだからである。

しかし、得られた結果からは、観察者の視線が対象に対して、少しでも直交性が保たれないと、途端に VHI 図形の垂直線の見えの長さに、著しい影響を及ぼした。視線が対象よりも上側に位置すると過大視、下側に位置すると過小視が生じる。しかし、これは俯仰観の影響であって、本来求めているものではない。

本研究からは、VHI を含む幾何学的錯視図形を用いた実験では、俯仰観要因は、排除すべき剰余変数であることが明らかになった。

しかし、その一方で、俯仰角度の変化に伴う長さの知覚に、有意で組織的な非対称性が見られたことは、観察者が対象を「見上げている」あるいは「見下ろしている」か、「それがどの程度なのか」という空間の知覚を決定する手がかりになることを示唆していた。それゆえ《第三研究》は、人間の俯仰瞰感覚に関する情報を初めて組織的に報告したという意味で、意義があると考えられる。この知見は、観察者が外界の三次元空間をどのように知覚しているか、という問題にとどまらず、対象だけでなく、観察者を三次元空間に巻き込んだ、視空間知覚にまで広がりを見せているように考えられる。

第5節 今後の課題

第3節にも述べたように、《第一研究》から浮上した課題は、水平線の接点位置に広がる、垂直線の M 字型の錯視量変化に関連する視覚処理の背景要因を特定することである。これは、三→二→三次元問題（石井, 2006）の解決において重要であり、今後、《第四研究》で用いた単独提示法を用いて、長さ-距離関数が、接点位置によってどのように影響するかを検討してみることが視野にいれている。

次に、《第四研究》では、見えの長さ-距離不変関数の勾配が、垂直線と水平線の間で違

いが見られたが、その勾配を規定する背景要因を特定することも視覚機構の解明には重要であろう。有力な要因としては、視野 (Künnapas, 1955b, 1957) が考えられる。なぜならば、網膜においてほぼ等しい領域を持ちながら、垂直軸では 135° 程度の視野情報を処理するのに対して、水平軸では 200° 程度と約 1.5 倍の視野情報を、圧縮して処理しなければならないからである (東山, 2012)。

また、《第四研究》からは、異方性への垂直線の関与が、従来の「分割」ではなく、「距離の決定」に貢献する可能性が見えてきた。この考えは、従来から言われる線遠近法であり、これまでは消失点を通る斜線がその例として挙げられてきた。しかし、今回の実験からは、消失点を通る垂直線や水平線も「距離の決定」に関与している可能性が見えてきた。

このように考えると、垂直線でも消失点を通るものと、消失点を通らないものとは、視空間知覚への関与が異なってくる可能性がある。そのような仮説では、《第一研究》の M 字型変化や消失点を通らない垂直線をもつ L 字図形と消失点を通る垂直線をもつ逆 T 字で錯視量に大きな差異が生じる現象も説明できるかも知れない。

また、《第三研究》は、VHI 錯視にとってはバイアス要因であることが明らかになったが、その一方で、観察者の俯仰瞰を伴う長さの知覚について、有用な情報を得ることができた。すなわち、俯仰角度に伴って有意で組織的な非対称性が見られたことは、観察者が対象を「見上げている」あるいは「見下ろしている」、また「それがどの程度なのか」という空間の知覚を決定する手がかりとなり得るのである。それゆえ、今後は、観察者が外界の三次元空間にある対象をどのように知覚しているかという問題にとどまらず、対象だけでなく、観察者を三次元空間に巻き込んだ、視空間知覚の研究への手がかりになると考えている。

ここで気をつけなければならない点が存在する。それは実験装置の信頼性や妥当性というような実験装置を開発した際の検討事項や、実験参加者の学習効果に関する検討が行えていないということである。前者については、実験装置自体の特性を理解することが通常必要であるが、本研究ではできていない。そのことから、今後実験を行う際にはこのことを検討する必要があるだろう。また実験参加者の学習効果については提示条件をランダムにしていたが、不十分であった可能性が否めない。そのことから、再検討が必要な個所と考えられる。

第6節 結言

緒言でも述べてきたように、将来的には、人間の視知覚機構に関与する知見をもとに、人間型ロボットの研究、特にロボットアイに活かしたいと考えている。近年 AI などの研究が盛んに行われており、2018 年には基礎生物学研究所や立命館大学などの共同研究グループが「蛇の回転錯視」が AI にも起こることを実証した。このように最近では心理学分野と工学分野の研究が近づきつつある中、筆者も、人間と同じように「錯視」が生じる視覚処理機構を有するロボットを目指し、多くの課題を乗り越え実現していきたいと思っている。

そしてこれらの課題を乗り越えた先には、視知覚機構を持ったカメラや AI が開発されるため、例えば危険な場所への人間の適応についての検討や、自動運転の際により人間に寄り添い、今よりもより乗り心地の良い運転手法を再現できる。また、人間が有する錯視など視知覚情報の錯誤を克服できるため、現在実用化が進む VR において、実際に人間の眼に近い感覚の付加による三次元のリアリティ性の向上や遠隔三次元画像情報から正確な三次元画面への実現に繋がると考えている。そして福祉の分野などでは現在 18 歳未満で家族のケアのために人生を犠牲にしている“ヤングケアラー”と呼ばれる若者がいる。もし視知覚機構を持った福祉ロボットを開発することができれば、彼らに代わって支援ができるため、彼らの負担を軽減したり、ケアをしたりもできるのではないだろうか。

引用文献

- Armstrong, L., & Marks, Lawrence E. (1997). Differential effects of stimulus context on perceived length: Implications for the horizontal-vertical illusion. *Perception & Psychophysics*, 59(8), 1200-1213.
- Avery, G. C. (1970). Error of standard in the horizontal-vertical illusion. *Perception & Psychophysics*, 8(1), 26-28.
- Avery, G. C., & Day, R. H. (1969). Basis of the horizontal-vertical illusion. *Journal of Experimental Psychology*, 81(2), 376-380.
- Bayer, C. A., & Pressey, A.W. (1972). Geometric illusions as a function of pigmentation of the fundus oculi and target size. *Psychonomic Science*, 26, 77-79.
- Begelman, D. A., & Steinfeld, G. (1967). An investigation of several parameters of the horizontal-vertical illusion. *Perception & Psychophysics*, 2(11), 539-543.
- Begelman, D. A., & Steinfeld, G. (1971). Retinal vs. phenomenal determinations of the horizontal-vertical illusion. *Journal of General Psychology*, 85, 77-85.
- Blanusa, J., & Zdravkic, S. (2015). Horizontal-vertical illusion in mental imagery: quantitative evidence. *frontiers in Human Neuroscience*, 9, 1-11.
- Boring, E. G. (1942). *Sensation and perception in the history of experimental psychology*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Brosvic, G. M., Bailey, S., Baer, A., Dihoff, R. E., Caroenter, L., Baker, S., & Cook, M. (1993). Developmental susceptibility to the horizontal-vertical illusion. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 31(6), 609-612.
- Brosvic, G. M., & Cohen, B. D. (1988). The horizontal-vertical illusion and knowledge of results. *Perceptual and Motor Skills*, 67(2), 463-469.
- Buddeley, R. J., & Hancock, P. J. B., (1991). Statistical analysis of natural images matches psychophysically derived orientation tuning curves. *Proceedings of the Royal society of London. Series B. Biological sciences*, 246, 219-223.
- Burmester, E. (1896). Beiträge zur experimentellen Bestimmung geometrisch-optischer Täuschungen. *Zeitschrift für Psychologie*, 12, 355-394.
- Chapanis, A., & Mankin, D. A. (1967). The vertical-horizontal illusion in a visually-rich

- environment, *Perception & Psychophysics*, 2(6), 249-255.
- Charras, P., & Lupiáñez, J. (2009). The relevance of symmetry in line length perception. *Perception*, 38, 1428-1438.
- Charras, P., & Lupiáñez, J. (2010). Length perception of horizontal and vertical bisected lines. *Psychological Research*, 74, 196-206.
- Chouinard, P. A., Unwin, K. L., Landry, O., & Sperandio, I. (2016). Susceptibility to optical illusions varies as a function of the autism-spectrum quotient but not in ways predicted by local-global biases. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46, 2224-2239.
- Chouinard, P. A., Peel, H. J., & Landry, O. (2017). Eye-tracking reveals that the strength of the vertical-horizontal illusion increases as the retinal image becomes more stable with fixation. *frontiers in Human Neuroscience*, 11(143), 1-14.
- Coren, S., & Girgus, J. S. (1978). *Seeing is deceiving: The psychology of visual illusions*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cormack, E. O., & Cormack, R. H. (1974). Stimulus configuration and line orientation in the horizontal-vertical illusion. *Perception & Psychophysics*, 16(2), 208-212.
- Craven, B. J. (1993). Orientation dependence of human line-length judgments matches statistical structure in real-world scenes. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 253, 101-106.
- Craven, B. J., & Watt, R. J. (1989). The use of fractal image statistics in the estimation of lateral spatial extent. *Spatial Vision*, 4, 223-239.
- Day, R. H. (1972). Visual spatial illusions: a general examination. *Science*, 175, 1335-1340.
- Day, R. H., & Avery, G. C. (1970). Supplementary Reports Absence of the horizontal-vertical illusion in haptic space. *Journal of Experimental Psychology*, 83(1), 172-173.
- de Montalembert, M., & Mamassian, P. (2010). The vertical-horizontal illusion in hemi-spatial neglect. *Neuropsychologia*, 48, 3245-3251.
- Delboeuf, M. J. (1865). Note sur certaines illusions d'optique: Essai d'une théorie psychophysique de la manière dont l'oeil apprécie les distances et les angles.

Bulletin de l'Académie Royale des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique, II Série, 19, 195-216.

Deregowski, J., & Ellis, H. D. (1972). Effect of stimulus orientation upon haptic perception of the horizontal-vertical illusion. *Journal of Experimental Psychology*, *95*(1), 14-19.

Ebbinghaus, H. (1902). *Grundzüge der Psychologie: Erster Band*. Leipzig: Veit.

Edwards, K. R., Brosvic, G. M., & Dihoff, R. E. (1993). Influences of academic training and nonacademic experience on susceptibility to the horizontal-vertical illusion. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *31*(5), 465-467.

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, 国際医療福祉大学, *3*, 71-77.

Fick, A. (1851). *De errore optico quodam asymmetria bulbi oculi effecto*. Koch, Marburg.

Finger, F. W., & Spelt, D. K. (1947). The illustration of the horizontal-vertical illusion. *Journal of Experimental Psychology*, *37*(3), 243-250.

Fraisse, P., & Vautrey, P. (1956). The influence of age, sex, and specialized training on the vertical-horizontal illusion. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *8*(3), 114-120.

藤井 輝男 (1994). 錯視, キーワードコレクション 心理学 重野 純 (編) (pp. 84-87) 新曜社

藤田 一郎 (2007). 第 6 章 二つの目で見ると「見る」とはどういうことか 脳と心のか関係をさぐる (pp.155-199) 化学同人

Fujita, K., Blough, D. S., & Blough, P. M. (1993). Effects of the inclination of context lines on perception of the Ponzo illusion by pigeons. *Animal Learning & Behavior*, *21*, 29-34.

福田 博史・伊藤 法瑞・荻阪 良二 (1982). 垂直水平錯視図観察中の眼球運動 日本心理学会第 46 回大会論文集, 68.

福田 忠彦 (1978). 図形知覚における中心視と周辺視の機能差 テレビジョン学会誌, *32*, 6, 492-499.

Gardner, R.W., & Long, R. I. (1960). Errors of the standard and illusion effects with

- inverted-T. *Perceptual and Motor Skills*, 10, 47-54.
- Girgus, J. S., & Coren, S. (1975). Depth cues and constancy scaling in the horizontal-vertical illusion: The bisection error. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, 29(1), 59-65.
- 後藤 倬男・田中 平八 (2005). 序章 錯視とは何か 錯視の科学ハンドブック 後藤 倬男・田中 平八 (編) (pp. i-v) 東京大学出版会
- Gregory, R. L. (1963). Distortion of visual space as inappropriate constancy scaling. *Nature*, 199, 678-680.
- Gregory, R. L. (1973). A discussion of G. H. Fisher's "Toward a new explanation for the geometrical illusions: Apparent depth or contour proximity?" and the inappropriate constancy-scaling theory. *British Journal of Psychology*, 64, 623-626.
- Gregory, R.L. (1997). *Eye and brain: The psychology of seeing*, 5th edition. Princeton University Press.
- Hamburger, K., Hansen, T., & Gegenfurtner, K. R. (2007). Geometric-optical illusions at isoluminance. *Vision Research*, 47, 3276-3285.
- Hamburger, K., & Hansen, T. (2010). Analysis of individual variations in the classical horizontal-vertical illusion. *Atten Percept Psychophys*, 72(4), 1045-1052
- Hanley, C., & Zerbolio, D. T. (1965). Developmental changes in five illusions measured by the up-and-down method. *Child Development*, 36, 437-452.
- Harrington, D. O. (1981). *The visual fields: Textbook and atlas of clinical perimetry*. St. Louis: C. V. Mosby.
- Hartline, H. K. (1940). The nerve messages in the fibers of the visual pathway. *Journal of the Optical Society of America*, 30, 39-247.
- 長谷川 智美・早坂 太一 (2012). 視覚系の男女差に着目した色情報処理モデル 電子情報通信学会技術研究報告. NC, ニューロコンピューティング, 112(298), 33-38.
- Heller, M. A., Calcaterra, J. A., Burson, L. L., Green, S. L. (1996). The tactual horizontal-vertical illusion depends on radial motion of the entire arm. *Percept Psychophys*, 59(8), 1297-1311.
- Heller, M. A., & Joyner, T. D. (1993). Mechanisms in the haptic horizontal-vertical

- illusion: evidence from sight and blind subject. *Percept Psychophys*, 54 (4), 422-428.
- Hering, E. (1861). *Beiträge zur Physiologie. I. Zur Lehre vom Ortsinne der Metzhaut*. Laipzig: Engelman.
- Higashiyama, A. (1992). Anisotropic perception of visual angle: Implications for the horizontal-vertical illusion. *Perception & Psychophysics*, 51 (3), 218-230.
- Higashiyama, A. (1996). Horizontal and vertical distance perception: The discorded-orientation theory. *Perception & Psychophysics*, 58, 259-270.
- 東山 篤規 (1997). 野外における垂直・水平距離の知覚 *VISION*, 9, 217-224.
- 東山 篤規 (2012). 体と手がつくる知覚世界 勁草書房
- Higashiyama, A., & Adachi, K. (2006). Perceived size and perceived distance of targets viewed from between the legs: Evidence for proprioceptive theory. *Vision Research*, 46, 3961-1976.
- 平井 誠也 (1972). 錯視に関する発達的研究 長崎大学教育学部教育科学研究報告, 19, 61-73.
- Hilano, T., Yanaka, K. (2011). New optical illusion by animating judd illusion using scalable vector graphics. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP-2011)*, 401-404.
- Holway, A. H., & Boring, E. G. (1941). Determinations of apparent visual size with distance variant. *American Journal of Psychology*, 54, 21-37.
- Houck, R. L., Mefferd, R. B. Jr. & Greenstein, G.J. (1972). Influence of a visual frame and vertical-horizontal illusion on shape and size perception, *Journal of Experimental Psychology*, 96 (2), 273-279.
- Howe, C. Q., & Purves, D. (2002). Range image statistics can explain the anomalous perception of length. *PANAS*, 99 (20), 13184-13188
- Howe, C. Q., & Purves, D. (2005). Natural-scene geometry predicts the perception of angles and line orientation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102 (4), 1228-1233.
- 池田 光男 (1988). 眼はなにを見ているか 視覚系の情報処理 平凡社
- 今井 省吾 (1960). 幾何学的錯視に関する研究の現状 心理学研究, 30 (5), 58-67.

- 今井 省吾 (1984). 錯視図形・見え方の心理学 サイエンス社
- 生澤 雅夫 (1958). 図形の方位と認知及びその発達 人文研究, 9(4), 349-367.
- 石井 雅博 (2006). だまされる脳 バーチャルリアリティと知覚心理学入門, 日本バーチャルリアリティ学会 VR 心理学研究委員会 (編) (pp.27-39) 講談社
- 市川 典義 (1977). 両眼視と単眼視における場の強さの差異について 名古屋工業大學學報, 28, 11-19.
- 石津 希代子 (2011). 利きの発達と左右差 日本大学大学院総合社会情報研究科紀要, 12, 157-161.
- 乾 敏郎(1993). Q & A でわかる脳と視覚 ー人間からロボットまでー (p.8) サイエンス社
- Jastrow, J. (1891). A study of Zöllner's figures and other related illusions. *American Journal of Psychology*, 4, 381-398.
- Julesz, B. (1971). *Foundations of cyclopean perception*. Chicago: University of Chicago Press.
- 金子 寛彦 (2010). 第 46 回 知っておきたいキーワード 固視微動 映像情報メディア学会誌, 63(11), 1538-1539.
- 金子 弘・西村 淳・格内 敏・森田 雅行・坂本 学 (2005). 三次元計測を用いたメガネのベストフィッティングに関する研究 (第 1 報) 眼鏡の頂間距離 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, B69D-B70D.
- Kawai, S. (2002a). Heaviness perception I. Constant involvement of haptically perceived size in weight discrimination. *Experimental Brain Research*, 147 (1), 16-22.
- Kawai, S. (2002b). Heaviness perception II. Contributions of object weight, haptic size, and density to the accurate perception of heaviness or lightness. *Experimental Brain Research*, 147(1), 23-28.
- Kawai, S. (2003a). Heaviness Perception III. Weight/aperture in the discernment of heaviness in cubes haptically perceived by thumb-index finger grasp. *Experimental Brain Research*, 153 (3), 289-296.
- Kawai, S. (2003b). Heaviness Perception IV. Weight x aperture⁻¹ as a heaviness model in finger-grasp perception. *Experimental Brain Research*, 153 (3), 297-301.
- Kawai, S., Henigman, F., MacKenzie, C.L., Kuang, A.B., & Faust, P.H. (2007). A

- reexamination of the size-weight illusion induced by visual size cues. *Experimental Brain Research*, 179, 443-456.
- 川合 悟 (2010). PC-EYE: 人間の「眼」をもつコンピューター, 一視覚機構の理解をより深めるためにー 日本応用心理学会第 77 回大会抄録集, 81.
- 川人 光男 (1992). 脳の仕組み 読売科学選書 (p.48) 読売新聞社
- 城戸 幡太郎. (1927). 知覚に於ける形態の表象と関係の判断ーミュラー・ライエル氏図形についての実験 心理学研究, 2, 262-282.
- Kinoshita Y., Tang, Z., & Ishii, M. (2012). Horizontal Vertical Illusion by Touch. *i-Perception*, 3, 633.
- 北岡 明佳 (2005). 幾何学的錯視 後藤卓男・田中平八 (編) 錯視の科学ハンドブック (pp. 56-100) 東京大学出版会
- 北岡 明佳 (2010). ものの大きさや傾きが変わって見える錯覚 ー幾何学的錯視ー フィック錯視と上方の過大視 錯視入門 (pp. 10-11) 朝倉書店
- Kundt, A. (1863). Untersuchungen über Augenmass und optische Täuschungen. *Annalen der Physik und Chemie*, 120, 118-158.
- Künnapas, T. M. (1955a). An analysis of the “Vertical-Horizontal illusion”. *Journal of Experimental Psychology*, 49 (2), 134-140.
- Künnapas, T. M. (1955b). Influence of frame size on apparent length of a line. *Journal of Experimental Psychology*, 50 (3), 168-170.
- Künnapas, T.M. (1957a). Vertical-Horizontal illusion and surrounding field. *Acta Psychologica*, 13, 35-42.
- Künnapas, T. M. (1957b). Interocular differences in the vertical-horizontal illusion. *Acta Psychologica*, 13, 253-259.
- Künnapas, T. M. (1957c). The Vertical-Horizontal illusion and the visual field. *Journal of Experimental Psychology*, 53 (6), 405-407.
- Künnapas, T. M. (1958a). Influence of head inclination on the vertical-horizontal illusion. *The Journal of Psychology*, 46, 179-185.
- Künnapas, T. M. (1958b). Fixation and the vertical-horizontal illusion. *Acta Psychologica*, 14, 131-136.
- Künnapas, T. M. (1959). The Vertical-horizontal illusion in artificial visual fields. *The*

- Journal of Psychology*, 47, 41-48.
- Leibowitz, H. W. (1965). *Visual Perception*. New York: Macmillan.
- Li, Z., & Durgin F. H. (2017). A Large-Scale Horizontal-Vertical Illusion Produced With Small Objects Separated in Depth. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 43(8), 1473-1479.
- Luckiesh, M. (1922). *Visual Illusions: Their Causes, Characteristics and Applications*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- 牧野 達郎・加藤 正仁 (1972). 遠近法錯視に関する実験的研究 (1) 日本心理学会第 36 回大会発表論文集, 142-143.
- Mamassian, P., & de Montalembert, M. D. (2010). A simple model of the vertical-horizontal illusion. *Vision Research*, 50(10), 956-962.
- Mamassian, P., & Landy, M. S. (2001). Interaction of visual prior constraints. *Vision Research*, 41, 2653-2668.
- Mankin, D. A. (1969). The influence of perceptual anchors and visual noise on the vertical-horizontal illusion. *Perception & Psychophysics*, 5(3), 149-154.
- Marma, V., Bulatov, A. & Bulatova, N. (2015). Psychophysical Study of Vertical-Horizontal Illusion, *Proceedings of 37th International Conference of Biomedical Engineering*, 19(1), 70-73.
- 松田 隆夫 (1997). 視知覚 培風館
- McBride, S. A., Risser, J. M., & Slotnick, B. M. (1987). The horizontal-vertical illusion: independence of line bisection and a comparison line. *Perceptual and Motor Skills*, 64, 943-948.
- Meyer, G. E. (1986). Interactions of subjective contours with the Ponzo, Müller-Lyer, and vertical-horizontal illusions. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 24 (1), 39-40.
- Michaels, R.M. (1960). Anisotropy and interaction of fields of spatial induction. *Journal of Experimental Psychology*, 60, 235-241.
- Mikellidou, K., & Thompson, P. (2013). The vertical-horizontal illusion: Assessing the contributions of anisotropy, abutting, and crossing to the misperception of simple line stimuli. *Journal of Vision*, 13, 1-11.

- Millar, S., & Al-Attar, Z. (2000). Vertical and bisection bias in active touch. *Perception*, 29, 481-500.
- 三浦 健一郎・坂戸 勇介・河野 憲二・小川 正 (2011). サッケードと追跡眼球運動の視標選択のメカニズム 電子情報通信学会技術研究報告. NC, ニューロコンピューティング, 電子情報通信学会, 111 (96), 61-66.
- 盛永 四郎 (1933). ツェルネル氏錯視の研究 心理学研究, 8, 195-242.
- 盛永 四郎 (1935). 大きさの同化対比の条件 増田博士謝恩最近心理学論文集, 岩波書店, 28-48.
- Morinaga, S., Noguchi, K., & Ohishi, A. (1962). The horizontal-vertical illusion and the relation of spatial and retinal orientations. *Japanese Psychological research*, 4 (1), 25-29.
- 元良 勇次郎 (1890). 心理学 金港堂
- Müller-Lyer, F. C. (1899). Optische Urteilstäuschungen. *Archiv für Anatomie und Physiologie, Physiologische, Abteilung*, 2, 263-270.
- 村井 彩音・石井 雅博 (2015). 幾何学錯視図形の線分の長さ判断における方略観察の効果 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 645-646.
- Murakami, Y., Mizuno, T., Yamanaka, Y., Huo, M., & Murakami, S. (2019). The Fick illusion increases toe-clearance when going up stairs. *The 28th International Meeting of Physical Therapy Science in Korea*, 15.
- 村瀬 律男 (1968). 幾何学的錯視の発達的研究 日本心理学会第 32 回大会発表論文集, 142.
- 野上 俊夫・上野 陽一 (1909). 実験心理学講義 同文館
- 小田 浩一 (1999). 中心視と周辺視の機能的差異 ロービジョンの研究から VISION, 12 (4), 183-186.
- 小原 宏基・渡邊 拓人・川合 悟 (2016a). 垂直-水平錯視再考Ⅱ. 垂直線を基線とする錯視量カーブー 日本応用心理学会第 83 回大会発表論文集, 14.
- 小原 宏基・渡邊 拓人・川合 悟 (2016b). 垂直-水平錯視再考ー錯視量カーブの形状検討ー 関西心理学会第 128 回大会発表論文集, 43.
- 小原 宏基・川合 悟 (2020a). 垂直-水平錯視再考ー接点位置, 向きおよび単眼・両眼視が錯視量変化に及ぼす影響ー 基礎心理学研究, 38 (2), 214-226.

- 小原 宏基・川合 悟 (2020b). 垂直-水平錯視再考－明所視, 薄明視および暗所視が錯視量変化に及ぼす影響－ 帝塚山大学心理科学論集, 3, 13-20.
- 小原 宏基・川合 悟 (2021). 垂直-水平錯視再考－観察者の俯瞰および仰瞰が錯視量変化に及ぼす影響－ 帝塚山大学心理科学論集, 4, 11-21.
- 大野 晋一 (1959). 垂直-水平錯視の研究 人文研究：大阪市立大学大学院文学研究科紀要, 10(5), 460-479.
- 大野 晋一 (1961). 垂直-水平錯視の研究 (2): 測定法を中心として 人文研究：大阪市立大学大学院文学研究科紀要, 12(3), 235-247.
- 大野 晋一 (1963). 知覚空間の異方性に関する実験的研究 (7)所謂, 方向の錯視について (その 1) 日本心理学会第 27 回大会発表論文集, 67.
- 大野 晋一 (1966). 知覚空間の異方性に関する実験的研究 (9)所謂, 垂直・水平錯視について (その 5) 日本心理学会第 30 回大会発表論文集, 47.
- 大坪 治彦 (1988). 錯視図形に対する触知覚認知 鹿児島大学教育学部研究紀要 教育科学編, 40, 371-386.
- 大槻 快尊 (1911). 実験心理学 成美堂
- Oppel, J. J. (1855). Über geometrisch-optische Täuschungen. [About geometric-optical illusions] Jahresbericht des Frankfurter Vereins, 1854-1855, 37-47.
- Oyama, T. (1960). Figure-ground dominance as a function of sector-angle, brightness, hue, and orientation. *Journal of Experimental Psychology*, 60, 299-305.
- Oyama, T. (1975). Determinants of the Zöllner illusion. *Psychological Research*, 37, 261-280.
- 大山 正 (2005). わが国における「錯視」研究の歴史, 錯視研究の意義 後藤卓男・田中平八 (編) 錯視の科学ハンドブック (pp. 2-14) 東京大学出版会
- 大山 正 (2008). 誌上討論 空間の知覚と認知のモデル 空間の知覚・認知モデル検討のための実証的方法論をめぐって 認知科学, 15(4), 683-688.
- Oyama, T., & Morikawa, K. (1985). Temporal development of optical illusions. In J. I. McGaugh (Ed.), *Contemporary psychology: Biological process and theoretical issues*. Amsterdam: North-Holland., 385-393.
- Pearce, D., & Matin, L. (1969). Variation of the magnitude of the horizontal-vertical illusion with retinal eccentricity. *Perception & Psychophysics*, 6(4), 241-243.

- Piaget, J., Bang, V., & Matalon, B. (1958). Note on the law of the temporal maximum of some optico-geometric illusions. *The American journal of psychology*, 71 (1), 277-282.
- Pirenne, M. H. (1967). *Vision and the eye*. London: Chapman & Hall.
- Перельман, Я. И. (1959). *Занимательная геометрия*. Время.
(ペレルマン ヤ・イ, 物部 長興 (訳) (1962). たのしい幾何学〈第1〉三角形の魔術 みすず書房)
- Prinzmetal, W., & Gettleman, L. (1993). Vertical-horizontal illusion: One eye is better than two. *Perception & Psychophysics*, 53(1), 81-88.
- Pollock, W. T., & Chapanis, A. (1952). The Apparent length of a Line as a function of its inclination. *Quarterly journal of experimental psychology*, 170-178.
- Ponzo, M. (1912). Rapports entre quelques illusions visuelles de contraste angulaire et l'appréciation de grandeur des astres à l'horizon. *Archives Italiennes de Biologie*, 58, 327-329.
- Renier, L., Bruyer, R. & De Volder, A. G. (2006). Vertical-horizontal illusion present for sighted but not early blind humans using auditory substitution of vision. *Percept Psychophys*, 68(4), 535-542.
- Restle, F., & Merryman, C. (1969). Distance and an illusion of length of line. *Journal of Experimental Psychology*, 81 (2), 297-302.
- Ritter, S. M. (1917). The vertical-horizontal illusion: An experimental study of meridional disparities in the visual field. *The Psychological Monographs*, 23 (4), i-115.
- Ro, T., & Rafal, R. (1996). Perception of geometric illusions in hemispatial neglect. *Neuropsychologia*, 34(10), 973-978.
- Robinson, J. O. (1998). THE VERTICAL-HORIZONTAL ILLUSION. *The Psychology of Visual Illusion*, Dover Publications, 96-100.
- Rock, I. (1956). The orientation of forms on the retina and in the environment. *American Journal of Psychology*, 69, 513-528.
- Rock, I., & Heimer, W. (1957). The effect of retinal and phenomenal orientation on the perception of form. *American Journal of Psychology*, 70, 493-511.

- 坂井 健雄・岡田 隆夫 (2009). G 眼の構造と視覚, 第 8 章 情報の受容と処理, 系統看護学講座 専門基礎分野 解剖生理学, 人体の構造と機能[1] (pp.418-429) 医学書院
- 産業技術総合研究所デジタルヒューマン工学研究センター (2014). 日本人頭部寸法データベース 2001 HP, <https://www.dh.aist.go.jp/database/head/>, 閲覧日: 2017 年 12 月 6 日.
- Schiffman, H. R., & Thompson, J. (1975). The role of figure orientation and apparent depth in the perception of the horizontal-vertical illusion. *Perception*, 4 (1), 79-83.
- Sheridan, J. J. (1966). *The vertical-horizontal illusion in the tactual modality*. University of Windsor.
- Shipley, W. C., Nann, B. M., & Penfield, M. J. (1949). The apparent length of tilted lines. *Journal of Experimental Psychology*, 39, 548-551.
- Stacey, B. G. (1969). Explanations of the horizontal-vertical illusion and the foreshortening of receding horizontals. *Life Sciences*, 8, 1237-1246.
- Suto, Y. (1960). Study on the interdependence of the horizontal-vertical illusion and the divided illusion: 1. *Japanese Psychological research*, 2 (3), 81-93.
- 竹原 卓真 (2010). 3 要因の分散分析をすべてカバー SPSS のススメ (2) 北大路書房
- 竹原 卓真 (2013). 増補改訂 2 要因の分散分析をすべてカバー SPSS のススメ (1) 北大路書房
- 田島 幸男 (1960). 網膜対応子午線の相対的傾斜角度に関する研究 群馬大学
- Taylor, C. M. (2001). Visual and Haptic Perception of the horizontal-vertical illusion. *Perceptual and Motor skill*, 92, 167-170.
- Thompson, J., & Schiffman, H. R. (1974). The effect on the magnitude of the horizontal-vertical illusion of horizontal retinal eccentricity. *Vision Research*, 14 (12), 1463-1465.
- Thouless, R. H. (1931). Phenomenal regression to the “real” object. *British Journal of Psychology*, 22, 216-241.
- Titchener, E. B. (1901). *Experimental psychology; a manual of laboratory practice., Vol.1: Qualitative experiments, part 1: Student's manual*. New York: Macmillan.
- 上野 雄宏 (1968). 大きさの恒常性の研究 人文研究: 大阪市立大学大学院文学研究科紀要, 20 (2), 65-150.

- Valentine, C. W. (1912a). Psychological theories of the horizontal-vertical illusion, *British Journal of Psychology*, 5(1), 8-35.
- Valentine, C. W. (1912b). The effect of astigmatism on the horizontal-vertical illusion, and a suggested theory of the illusion. *British Journal of Psychology*, 5 (3), 308-330.
- Vette, R. L. (1964). *An Investigation of the Visual Processes Involved in the Vertical-Horizontal Illusion*. Western Michigan University.
- Vishton, P. M., Rea, J. R., Cutting, J. E., & Nuñez, L. N. (1999). Comparing Effects of the Horizontal-Vertical Illusion on Grip Scaling and Judgment: Relative Versus Absolute. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 1999, 25(6), 1659-1672.
- von Collani, G. (1979). An analysis of illusion component with \perp and \perp -figures in active touch. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 31, 241-248.
- von Collani, G. (1985a). The Horizontal-vertical illusion in photographs of concrete scenes with and without depth information. *Perceptual and Motor Skills*, 61, 523-531.
- von Collani, G. (1985b). Retinal projection or size constancy as determinants of the horizontal-vertical illusion?. *Perceptual and Motor Skills*, 61, 547-557.
- 和田 陽平 (1971). ポンゾ錯視について 人文学報 (*The Journal of Social Sciences and Humanities*) 東京都立大学 人文学部, 83, 1-12.
- Walters, S. A. (1942). A genetic study of geometrical optical illusions. *Genetic Psychology Monographs*, 25, 101-155.
- Westheimer, G. (2008). Illusion in the spatial sense of the eye: Geometrical-optical illusions and the neural representation of space. *Vision Research*, 48, 2128-2142.
- Williams, P.A., & Enns, J. T. (1996). Pictorial depth and framing have independent effects on the horizontal-vertical illusion. *Perception*, 25, 921-926.
- Winch, W. H. (1907). The Vertical-Horizontal illusion in school children. *Brit. J. Psychol*, 2, 220-225.
- Wolfe, U., Maloney, L.T., & Tam, M. (2005). Distortions of perceived length in the frontoparallel plane: Tests of perspective theories. *Perception & Psychophysics*, 67,

967-979.

- Wong, T. S., Ho, R., & Ho, J. (1974). Influence of shape of receptor organ on the horizontal-vertical illusion passive touch. *Journal of Experimental Psychology*, 103 (3), 414-419.
- Wong, T. S. (1977). Dynamic Properties of Radial and Tangential Movements as Determinants of the Haptic Horizontal-Vertical Illusion with an L Figure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3 (1), 151-164.
- Woodworth, R.S. (1938). *Experimental psychology*. New York: Holt.
- Wundt, W. (1897). *Outlines of Psychology*. Leipzig: Engelmann.
- Würsten, H. (1947). *L'Evolution des comparaisons de longueurs de l'enfant à l'adulte*. Neuchatel: Delachaux.
- Yacoub, E., Harel, N., & Ugurbil, K. (2008). High-field fMRI unveils orientation columns in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 10607-10612.
- 山内 昭雄・鮎川 武二 (2001). 視覚 感覚の地図帳 (pp. 16-33) 講談社
- 山本 敏哉 (2016). 屈折倒乱視, 直乱視, 微小乱視における偽水晶体眼の偽調節 筑波大学.
- 山上 暁 (1977). Ponzo 錯視の規定因 日本心理学会第 42 回大会発表論文集, 200-201.
- 山上 暁 (1978). Ponzo 錯視における 2 種のみえの大きさ変化 心理学研究, 49, 273-279.
- 安岡 晶子・石井 雅博 (2014). 奥行情報を含む垂直水平錯視の検討 2014 年度精密工学会北海道支部学術講演会講演論文集, 33-34.
- 矢内 浩文・尾崎 結 (2016). フリーハンドで描かれた正方形は横長になることについて 第 15 回情報科学技術フォーラム講演論文集, 393-394.
- Zhu, J. E., & Ma, W. J. (2017). Orientation-dependent biases in length judgments of isolated stimuli. *Journal of Vision*, 17(2:20), 1-19.
- Zimmermann, M. (1976). Neurophysiology of Nociception. Poter, R. (Ed.), *In: International Review of Physiology, Neurophysiology II* (X, pp. 179-221). University Park Press, Baltimore.
- Zöllner, F. (1860). Über eine neue Art von Pseudoskopie und ihre Beziehungen zu den von Plateau und Oppel beschriebenen Bewegungsphanomenen. *Annalen der Physik und Chemie*, 186, 500-523.

謝辞

本博士論文の執筆にあたり、多くの方々のお力添えをいただきました。帝塚山大学心理学部教授の川合悟先生には、私が修士課程に入学し知覚心理学特論の講義にてお会いしてからこれまで多くの御指導、御助言をいただきました。また研究に対する姿勢だけではなく、学生への接し方や教育方法、人間としての考え方など多くのことを学ばせていただきました。心より御礼申し上げます。この度博士号の取得に辺り、学外より学位審査に携わっていただきました大阪芸術大学芸術学部の武村泰宏教授、そして学内より学位審査に携わっていただきました帝塚山大学心理学部の永石高敏講師にも厚く御礼を申し上げます。また帝塚山大学心理学部の他の先生方や教学支援課の職員の皆様には様々なご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

そして現在勤務しております湊川短期大学人間生活学科の学科長 鶴田祥子教授をはじめ、多くの教職員の皆様には、勤務しながらの論文執筆をお許しいただき、様々な点でご協力およびご配慮をいただきました。深く御礼申し上げます。

また、帝塚山大学大学院心理科学研究科の大学院生および修了生と同大学心理学部の学生および卒業生の皆様には、毎回実験への参加を快く引き受けてくださったことで、本論文を執筆することができました。ここに深く感謝致します。

最後に、30歳代後半から博士後期課程に入学し、40歳になっても私の夢の実現のために、私のわがままを貫かせてくれ、大学院に通学させてくれた父と母、そのサポートをしてくれた弟 勇哉、そして日頃から惜しみない協力をしてくれた妻 久美がいなければ、ここまで来ることはできませんでした。心から感謝し、本書を捧げます。

2022年3月

小原宏基