

頭位傾斜による網膜座標の傾きが視力に及ぼす影響*

—縞視標・かな視標・読み課題による実験的研究—

稲垣 尚恵¹⁾

Effects of tilt of retinal coordinates caused by head tilt on visual acuity

-Experimental study with grating target, kana optotypes and reading tasks-

Hisae INAGAKI¹⁾

健常者に頭位傾斜のシミュレーションを行い、網膜座標の傾きと視標の傾きが視力に及ぼす影響について検討した。縞視標の方位弁別課題では網膜座標上 0°, ±90°の正答割合が高く±45°が低くなる oblique 効果が生じたが、かな視標の同定課題では生じず、網膜座標上 0°（正立）からの回転角度の増加により正答割合が低下した。読み課題では、網膜座標上 0°では頭位傾斜の効果は認められなかったが、網膜座標上±90°回転した条件では頭位傾斜 90°条件（側臥位）の読書速度が有意に遅かった。縞視標・かな視標でも側臥位の正答割合が有意に低く、頭位傾斜にもとづく眼球反対回旋（OCR）は頭位傾斜角度の 8.8~12.3%で、側臥位では OCR のばらつきも大きかったことから、側臥位での網膜座標の傾きに OCR が寄与し、視標の傾斜・頭位傾斜・OCR によって決定される網膜像の傾きと視標の処理過程の違いが視力に影響することが示唆された。

Keywords : 頭位傾斜, Oblique 効果, 眼球反対回旋, 網膜座標, 臨界文字サイズ

Head tilt, Oblique effect, Ocular Counterrolling (OCR), Retinotopic coordinate, Critical print size (CPS)

1. はじめに

視覚刺激に対する感受性が、水平・垂直方向より斜め方向が劣るという現象を、Appelle (1972) は“oblique 効果”と名づけた。障がい等により頭位傾斜があつたり、側臥位で日常生活を送ったりする児・者の網膜は、傾いており視標は網膜座標上傾いて呈示され、oblique 効果の影響を受けるのではないかという疑問が生じる。Luria (1963) は、頭位傾斜に伴って生じる眼球反対回旋 (Ocular Counterrolling : 以下 OCR) が oblique 効果を代償するのではないかと考察した。OCR は前庭動眼反射のひとつで頭の傾きと逆方向に生じるまわし向き運動と定義されており (Kompanejets, 1928), 網膜上の外界の映像を恒常安定化させようとするための生理的現象と理解されている (内野, 1993)。Luria (1963) は、OCR の量が頭位傾斜角度に比べて少ないことから、関与を論文の中で否定し、その後、Banks & Stolarz (1975), Lennie (1974) も OCR は oblique 効果に影響

*本研究は愛知淑徳大学大学院心理医療科学研究科倫理委員会の承認を得て行った（承認番号：2017-13 2021-01,2021-07）。

1) 愛知淑徳大学心理医療科学研究科 心理医療科学専攻 医療科学コース

を与えないと結論づけた。しかし、これらの先行研究は実際に OCR を測定したわけではない。そこで本研究では健常者に頭位傾斜のシミュレーションをして実験を行い、同一の実験参加者を対象として、同一の実験環境と実験条件で OCR の測定実験と縞視標の方位弁別課題を行い、oblique 効果と OCR の関係について検討するとともに、かな視標の同定課題や読み課題の読書速度を測定し、頭位傾斜と OCR によって生じる網膜座標の傾きが、視力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 虹彩紋理撮影による OCR 測定 (実験 1)

2-1. 目的

健常な実験参加者を対象に頭位傾斜のシミュレーションを行い、OCR の測定を行った。OCR の測定方法は、肢体に不自由を持つ児・者を対象に計測を行う可能性を視野に入れ、特殊な機器や薬剤を使用せず、市販のデジタルカメラ (TG-5: オリンパス) を使用して前眼部を撮影し、特徴的な虹彩紋理を手がかりに各頭位傾斜条件での OCR を計測することを目的とした。

表 1. 実験 1・実験 2 の実験参加者の測定眼・裸眼視力と屈折値

実験参加者	年齢	測定眼	裸眼視力	他覚的屈折値 (無散瞳)
①	19	右	2.0	S+0.50D
②	23	左	1.5	E
③	19	右	1.5	S-0.50D
④	19	右	1.5	S-0.50D=C-0.50DAX77°
⑤	19	右	1.5	S+0.25D=C-0.50DAX115°

2-2. 対象と方法

実験 1 と実験 2 の実験参加者、実験環境ならびに頭位傾斜条件は同一とし、暗室で行った。実験参加者は、めまい等を主訴とする耳鼻科疾患の既往がなく、斜位は 10 プリズム (Δ) 以内で回旋複視がない大学生・大学院生 5 名 (平均年齢 19.8 ± 1.6 歳)、測定眼は優位眼とした (表 1)。

頭位傾斜条件は、時計回りを+, 反時計回りを-とし、座位で頭位直立を頭位傾斜 0° 条件 (図 1 上)、頭位を反時計回りに 45° 傾斜させたものを傾斜 -45° 条件 (図 1 中右)、時計回りに 45° 傾斜させたものを頭位傾斜 $+45^\circ$ 条件 (図 1 中左)、左下側臥位を頭位傾斜 -90° 条件 (図 1 下) の計 4 条件とした。頭位傾斜条件は、頭位変更顎台とデジタル角度計で設定し、順序は無作為な順序で決定された。測定は、デジタルカメラの顕微鏡モードで、前眼部を撮影し、画像処理ソフト Image-J (Schneider, Rasband, & Eliceiri, 2012) を用いて特徴的な虹彩紋理を手がかりとして OCR を計測した。実験参加者 5 人の各頭位傾斜条件での OCR と、各頭位条件における OCR の割合について



図 1. 頭位傾斜条件 (実験 1・実験 2)

- 上 : 頭位傾斜 0° 条件
- 中左 : 頭位傾斜 $+45^\circ$ 条件
- 中右 : 頭位傾斜 -45° 条件
- 下 : 頭位傾斜 -90° 条件 (左下側臥位)

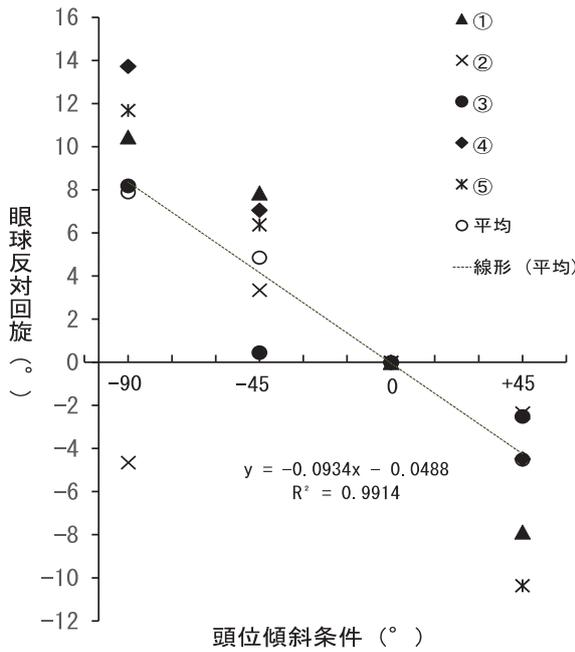


図 2. 実験参加者ごとの頭位傾斜条件と眼球反対回旋 (OCR) との関係

波線は平均の線形近似直線

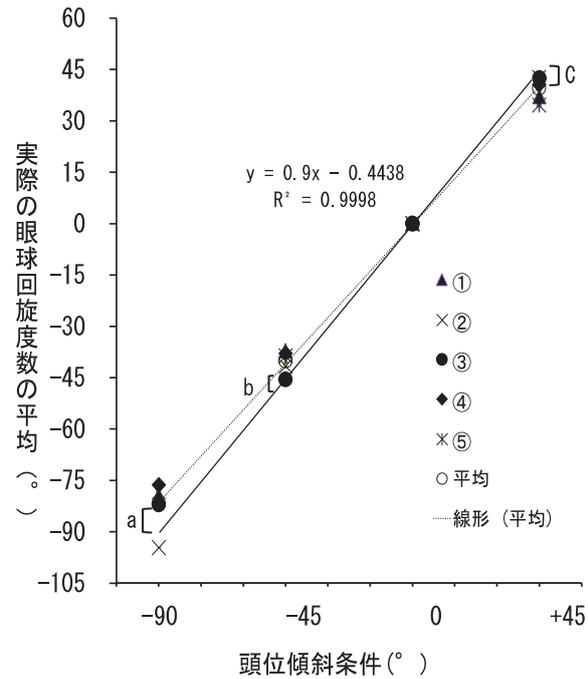


図 3. 実験参加者ごとの頭位傾斜条件と実際の眼球回旋量との関係

実線は頭位傾斜角度を結んだもの
波線は平均の線形近似値

一要因分散分析によって検討した。多重比較には Bonferroni 法を用いた。

2-3. 結果

実験参加者 5 名の平均の OCR と標準偏差は、頭位傾斜-90°条件は $+7.9^\circ \pm 7.8^\circ$ 、頭位傾斜-45°条件は $+4.8^\circ \pm 3.6^\circ$ 、頭位傾斜+45°条件は $-5.5^\circ \pm 3.9^\circ$ であった。分散分析の結果、頭位傾斜条件の主効果が認められ、頭位傾斜-90°条件の OCR は、頭位傾斜-45°、+45°条件より有意に大きかった ($p < .05$)。図 2 に実験参加者 5 名の頭位傾斜条件と OCR の平均の関係を示した。

平均の線形近似直線は $y = -0.0934x - 0.0488$, $R^2 = 0.9914$ であった。頭位傾斜-90°条件の OCR は標準偏差が大きく、個人間のばらつきも大きかった。図 3 に実験参加者ごとの各頭位傾斜条件と実際の OCR の関係を示した。実線は頭位傾斜角度を示し、実際の頭位傾斜との差 (a, b, c) が各頭位傾斜条件における OCR を示した。頭位傾斜-90°条件の OCR が有意に大きくなったのは、頭位の傾斜角度の増加によるものと考え、OCR 量を各頭位傾斜角度で除して各頭位傾斜角度条件での OCR の割合を求めた。その結果、頭位傾斜-90°条件では 8.8%、頭位傾斜-45°条件では 10.8%、頭位+45°条件では 12.3%、測定レンジは $-10.4^\circ \sim +13.7^\circ$ であった。各頭位傾斜条件における OCR の割合について統計を行ったところ、頭位-90°条件の頭位傾斜に対する OCR の割合は頭位+45°条件より有意に低かった ($p < .05$)。

2-4. 考察

実験 1 の頭位傾斜 $\pm 45^\circ$ 条件の OCR の測定結果は、実験 1 と同様に虹彩紋理を手がかりに Image-J を用いて OCR を測定した Hamasaki, Hasebe, & Ohtsuki (2005) の結果より少なかった。

た。この原因としては、Hamasaki et al. (2005) は、バイトバー等を使用し、厳密に頭位の傾斜角度を保ったが、実験1では肢体に不自由を持つ児・者のOCRの測定を視野にいて、あえて頭位の固定を厳密に行わなかったことにより、測定誤差が生じたことが考えられた。Bockisch & Haslwanter (2001) の結果との比較では、頭位傾斜 $\pm 45^\circ$ 条件のOCRの測定結果は近似したが、頭位傾斜 $\pm 90^\circ$ 条件では実験1のOCRの方が大きく測定された。この違いはBockisch & Haslwanter (2001) は、実験参加者の頭部を保護し、頭部を椅子に固定し、身体ごと回転させたが、実験1では日常の側臥位でのOCRを測定するためベッドに横臥させたという頭位傾斜 90° 条件の設定の違いによるものと考えられ、頭位傾斜 90° 条件は、ばらつきが大きいことが特徴である可能性も示唆された(Bockisch & Haslwanter, 2001)。OCRは、測定方法や頭位の固定方法によって影響を受けると考えられ、今後、頭位の固定方法、特に側臥位でのOCRについて検討していく必要がある。また、頭位の傾斜角度とOCRが生じる割合は一定ではなく、頭位傾斜 50° 付近までは頭位傾斜とともにOCRも増加するが、その後、頭位傾斜角度に対するOCRの割合は低下するとされている(Hamasaki et al., 2005; Diamond & Markham, 1983; 野村・渡辺・五十嵐・須藤・関口・石井・小林, 2000)。実験1の頭位傾斜 -90° 条件のOCRの割合は、頭位傾斜 $\pm 45^\circ$ 条件より減少しており、先行研究におけるOCRの効果の特徴と一致していることから、実験1のOCRの測定は、頭部の固定をほとんど行わなかったことを考慮すると、精度は劣るが十分に有効であると考えられた。

3. 頭位傾斜と縞視標の呈示角度が正答割合に及ぼす影響 (実験2)

3-1. 目的

視力検査の尺度のうち分離閾値を測定する縞視標を刺激として、空間周波数条件、頭位の傾斜角度(頭位傾斜条件)縞視標の呈示角度(視標呈示角度条件)を変化させ、縞視標の方位弁別課題を行い、頭位傾斜と縞視標の呈示角度が縞視力に及ぼす影響を検討することを目的とした。

3-2. 対象と方法

縞視標の制御・呈示はノートパソコン(Pavilion Gaming Notebook 15-ak052tx : HP Inc.)を使用した。画面サイズは視角 $12.3^\circ \times 7.0^\circ$ (345 mm \times 195 mm)、解像度は1920 \times 1080 pixel、リフレッシュレートは60Hzであった。固視点は直径 0.1° 、38.45 cd/m²、縞視標は最高輝度101.36cd/m²、最低輝度4.96cd/m²、Michelsonコントラスト91.0%の正弦縞とし、背景輝度53.16 cd/m²、ガボールフィルタをかけて呈示した。実験参加者、頭位傾斜条件は実験1と同じ、縞視標の呈示角度条件は頭位傾斜条件に合わせて4条件、空間周波数条件は15cycles/degree(以下cpd:小数視力0.50)から60cpd(小数視力2.00)までの7条件とした。観察距離は246cm、屈折矯正なしで片眼を遮閉し、暗室で暗幕を使ってできるだけ方位の手がかりを排除して実験を行った。実験の進行と回答は実験参加者がコントローラーを用いて行った。開始とともにランダムドットのマスク刺激が500ms、続いて固視点が500ms呈示され、その後、各空間周波数条件の縞視標が呈示され、実験参加者が縞視標の方位を回答すると1試行が終了した(図4)。視標呈示角度4条件 \times 空間周波数7条件計28試行を1セットとした。頭位傾斜4条件は実験参加者間で無作為化し、1条件につき5セット行った。各条件100回、実験参加者1人につき計11200試行測定した。縞視標の方位の正答を1、誤答を0と

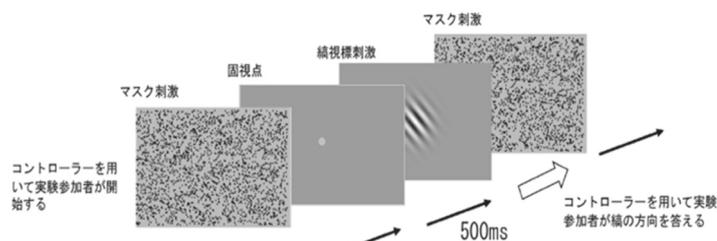


図4. 縞視標実験(実験2)の流れ

し、頭位傾斜角度（4 条件）、視標呈示角度（4 条件）、空間周波数（7 条件）の効果について三要因分散分析を行い検討した。多重比較は、Bonferroni 法を用いた。

3-3. 結果

すべての主効果、交互作用が有意であった（すべて $p < .0001$ ）。空間周波数条件の主効果は有意で、空間周波数が高くなるに従って正答割合が低くなり、空間周波数 60cpd 条件での正答割合は 0.256 ± 0.437 で、縞視標の回答の選択肢が 4 条件であることからほぼ見えていないと判断できた。図 5 に頭位傾斜条件別の空間周波数条件に伴う正答割合の変化を示した。空間周波数条件 24cpd 条件より低い空間周波数では頭位傾斜条件による正答割合の有意な差は認められなかったが、空間周波数 30cpd 条件、40cpd 条件において頭位傾斜条件による単純主効果が認められた（どちらも $p < .001$ ）。

空間周波数 30cpd 条件・40cpd 条件ともに、頭位傾斜 0°条件、-90°条件では、視標呈示角度 $\pm 45^\circ$ 条件で正答割合が低くなる oblique 効果が出現し、頭位傾斜 $\pm 45^\circ$ 条件では視標呈示角度 0°条件、-90°条件で低くなった。この結果より、網膜座標により情報の処理が行われていると考えられた。そこで視標の呈示角度から頭位傾斜角度を減じ、網膜座標上の呈示角度を求め、検討した。

視標の提示角度を網膜座標上の呈示角度に換えても、すべての主効果、交互作用が有意であった（すべて $p < .001$ ）。図 6 に、空間周波数 30cpd 条件、40cpd 条件での頭位傾斜条件別の網膜座標上の呈示角度に伴う正答割合の変化を示した。どちらの空間周波数条件においても頭位傾斜の有無に関わらず、oblique 効果が生じた。しかし、頭位傾斜 -90°条件は、どちらの空間周波数条件でも他の条件より正答割合が低く、oblique 効果は減弱、消失した。

頭位傾斜が起こると OCR が生じるため、網膜座標上の呈示角度は OCR 分ずれる。本研究の実験 1 で得られた各頭位傾斜条件での OCR を網膜座標上の呈示角度から減じ、OCR を含む網膜座標上の呈示角度とし、検討した（図 7）。図 7 から、網膜座標上 0°、 $\pm 90^\circ$ では、OCR が生じている頭位傾斜 $\pm 45^\circ$ 条件と頭位傾斜 0°条件の正答割合の間に有意差はなかった。しかし、網膜座標上 $\pm 45^\circ$ では、OCR の生じている頭位傾斜 $\pm 45^\circ$ 条件の正答割合が有意に低くなった。このことにより、頭位傾斜のある頭位傾斜 $\pm 45^\circ$ 条件は頭位傾斜 0°条件より oblique 効果が強く表れた。OCR による網膜座標上の呈示角度のずれが大きい頭位傾斜 -90°条件では他の頭位傾斜条件より、正答割合が有意に低くなり、oblique 効果も 30cpd 条件で減弱、40cpd 条件で消失した。

3-4. 考察

Oblique 効果は V1 の皮質ニューロンの特に単純型細胞によって情報処理されたことを示し、頭

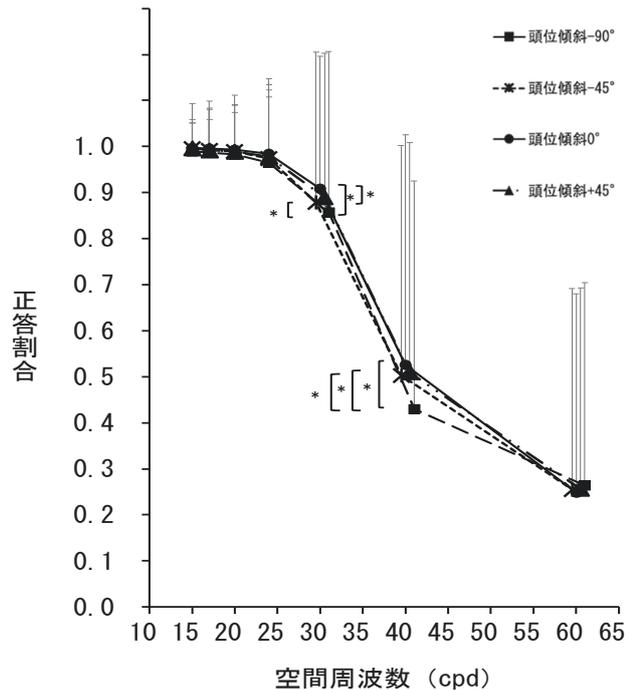


図 5 頭位傾斜条件別の空間周波数に伴う正答割合の変化

* $p < .05$ エラーバーは SD を示す

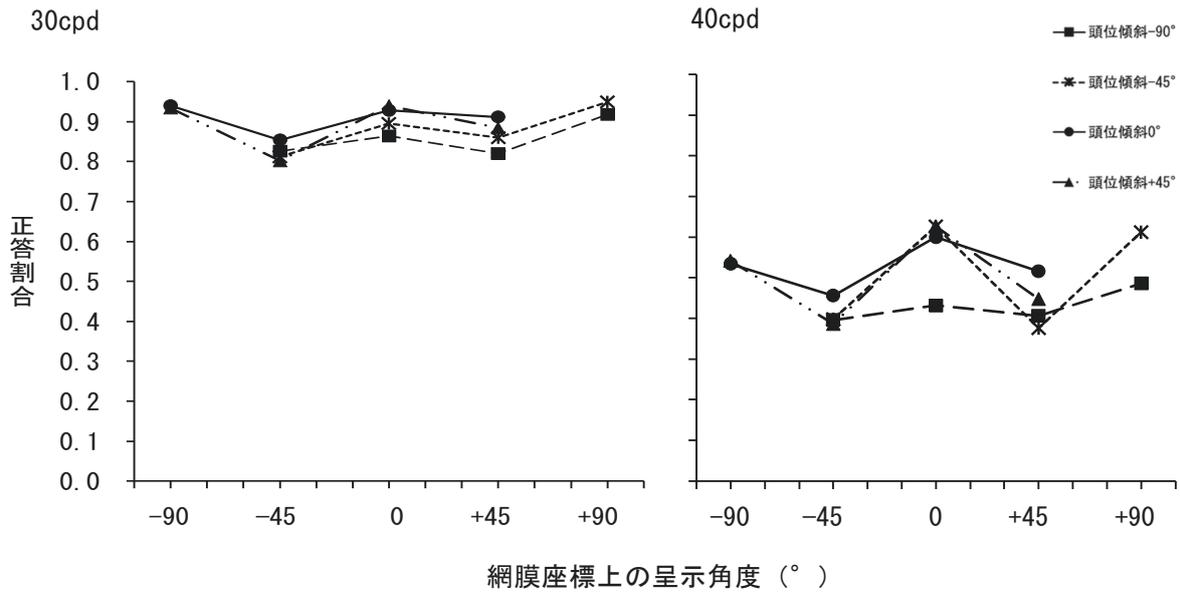


図6 頭位傾斜条件別網膜座標上の視標呈示角度に伴う正答割合の変化 (左 30cpd, 右 40cpd)

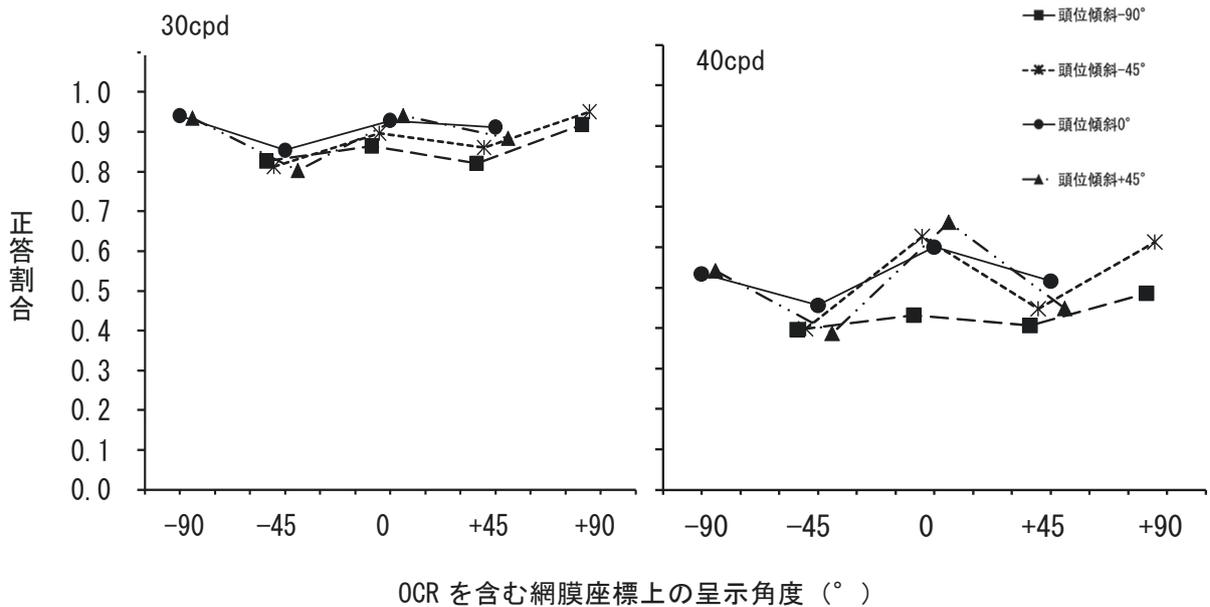


図7 頭位傾斜条件別の網膜座標とOCRを含む網膜座標上の呈示角度と正答割合の変化 (左 30cpd, 右 40cpd)

位傾斜があっても網膜座標に依存し生じるとされる (Appelle, 1972; Essock, 1980; 仲谷, 1981)。縞視標を刺激とした縞視標の方位弁別課題の結果, 網膜座標により oblique 効果が生じたことにより実験2の結果が, V1での情報処理に依存することが示された。

図7より, 網膜座標上の呈示角度 0°, ±90° 付近では, OCRによるずれは正答割合に影響を与えないが, 網膜座標上±45°付近では, OCR分の呈示角度のずれが正答割合に影響を与え, 頭位傾斜 0°条件より oblique 効果が強く表れたのではないかと考えられた。OCRは網膜上の外界の映像を恒常安定化させようとするための生理的現象と理解されており (内野, 1993), OCRは頭位傾斜

の情報を網膜に伝えられるとともに中枢系にも伝達し、自覚的視性垂直位の決定にも関与しているという考えもある (Kheradmand & Winnick, 2017; 小川, 2020)。自覚的視性垂直位は視覚的に認知される垂直位で (國弘, 2004), OCR と同様に頭位傾斜の角度とともに変化し、頭位の傾斜角度が 60° 以上になると 頭位傾斜と反対側に傾斜する E- effect から頭位と同じ方向に傾く A- effect に変化するとされる (Howard, 1982)。このことから、頭位傾斜が生じると網膜座標が傾き外界も傾いて投影されていると考えられる。頭位傾斜が $50\sim 60^\circ$ を超えると耳石の系統的誤差が生じるとしていることも報告されており (Kheradmand & Winnick, 2017), 側臥位での自覚的視性垂直位は $12^\circ\sim 21^\circ$ とばらつきも大きい (Aubert, 1861; Guerraz, Poquin, Luyat, & Ohlmann, 1998; Howard, 1982) とされることが実験 2 の頭位傾斜 -90° 条件での正答割合の低下や oblique 効果の減少・消失に OCR が関係しているのではないかと考える。OCR と自覚的垂直位関係性は未だ不明で (Tarnutzer, Shaikh, Palla1, Straumann, & S Marti, 2011), 側臥位では座位と異なる様々な要素が関わる (Diamond et al., 1978; Kheradmand & Winnick, 2017) とされている。

4. 頭位傾斜とかな視標の呈示角度が正答割合に及ぼす影響 (実験 3)

4-1. 目的

日常の学習や生活に深い関わりを持ち可読閾値を測定するかな視標を刺激として、かな視標の大きさ (視角) 条件, 頭位傾斜条件, かな視標の呈示角度条件を変化させ、正答割合を求めることにより、頭位傾斜とかな視標の呈示角度がかな視標の正答割合に及ぼす影響を検討した。

4-2. 対象と方法

実験参加者は眼科的疾患がなく、裸眼またはコンタクトレンズ矯正下で乱視度数が $0.5D$ 以下 (オートケラトレフラクトメータ KR-1, TOPCON) の大学生ならびに大学院生 4 名 (21.67 ± 2.05 歳) 4 眼, 測定眼は、優位眼とした。視標の作成, 制御はノートパソコン MacBook Air Retina, 13-inch (Apple) を使用し, 視標はディスプレイ VP2785-4K (ViewSonic®JP), 画面サイズ $9.6^\circ\times 17.1^\circ$ ($33.6\text{cm}\times 59.7\text{cm}$), 解像度 $3840\text{pix}\times 2160\text{pix}$ に呈示した。視標はひらがな 46 文字とし, かな視標のサイズ条件は 0.30° ($0.2\log\text{MAR}$) $\sim 0.10^\circ$ ($-0.3\log\text{MAR}$) の 6 条件, かな視標サイズの設定ならびにフォントは, MNREAD-J (小田, 2002; 小田・今橋, 1995) を基準とした (表 2)。頭位傾斜条件と視標の呈示角度条件は, それぞれ $0^\circ, +45^\circ, +90^\circ$ 条件の 3 条件とした。

ディスプレイ全面を黒色 (平均輝度 3.09 cd/m^2) 背景とし, 中心部に円形の白色領域 (平均輝度 254.97 cd/m^2) を配置して視標呈示面とし中央にかな視標刺激を呈示した (図 8)。視標呈示面の直径は, かな視標サイズの 3 倍 (図 9), かな視標刺激の平均輝度は 3.09 cd/m^2 , 文字コントラストは Michelson contrast で平均 97.6% , ディスプレイの周囲は直径 8.6° の円形に練り抜いた黒色ケント紙と暗幕を用いて方位の手がかりを取り除いた。実験は暗室で行い, 観察距離は 200cm , 頭位傾斜条件の設定方法は実験 1, 実験 2 に準じた。実験の開始, 進行は実験参加者自身が小型キーボードを操作することにより制御した。

かな視標およびかな視標の呈示角度はランダムイズされ, かな 46 文字 \times 呈示角度 3 条件 $=138$ 試行を 1 ブロックとした。ブロック内の頭位傾斜条件とかな視標のサイズ条件は固定し, 実験参加者間でカウンターバランスを取った。頭位傾斜条件 3 条件 \times 呈示角度条件 3 条件 \times かな視標のサイズ条件 6 条件の計 54 条件を 4 回繰り返し測定した。実験者は読みあげられた文字を記録するとともに IC レコーダーで録音し, 回答の記録と照合し, 正答を 1, 誤答を 0 として, 頭位傾斜条件 \times 呈示角度条件 \times かな視標のサイズ条件の効果について 3 要因分散分析によって検討した。多重比較には Bonferroni 法を用いた。

表 2. MNREAD-J における logMAR・小数視力・最小分離閾値とかな視標サイズの対応

logMAR	小数視力 1/MAR	最小分離閾値 (′) (MAR)	かな視標サイズ (°) MAR × (11.4/60)
0.2	0.63	1.58	0.30
0.1	0.79	1.26	0.24
0.0	1.00	1.00	0.19
-0.1	1.26	0.79	0.15
-0.2	1.58	0.63	0.12
-0.3	2.00	0.50	0.10

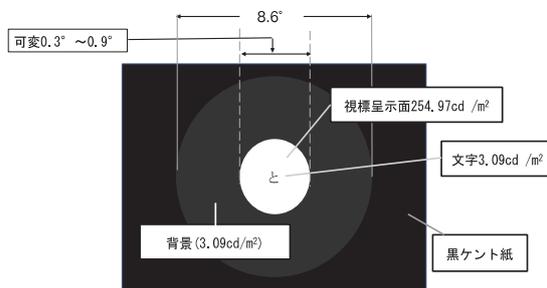


図 8. かな視標のサイズと視標呈示面
(視標の呈示角度 0° 条件)

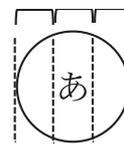


図 9. かな視標のサイズと視標呈示面の大きさ
の関係

視標呈示面の直径 = かな視標のサイズ条件 (°) × 3

4-3. 結果

すべての主効果, 交互作用が有意であった (すべて $p < .001$)。実験 2 と同様に視標が小さくなると正答割合が低くなった。図 10 に頭位傾斜条件別のかな視標の呈示角度と正答割合の変化を示した。どの頭位傾斜条件においても oblique 効果は生じることはなく, すべての頭位傾斜条件で頭位の傾斜と同じ角度の視標の呈示角度の条件の正答割合が高く, 頭位傾斜 0°, +90°条件では頭位視の回転角度が増加するに従って正答割合は有意に低下した ($p < .05$)。頭位傾斜+45°条件では, 90°回転する条件がないため, 呈示角度+45°条件の正答割合が高く, ±45°回転すると有意に正答割合が低下し ($p < .05$), 呈示角度 0°と+90°条件の間には有意差がなかった。0.15° (-0.1logMAR, 小数視力 1.26) 以下のかな視標のサイズ条件でかな視標の呈示角度条件の単純主効果があり, 0.12° (-0.2logMAR, 小数視力 1.58) 以下の視標のサイズ条件で頭位傾斜条件の単純主効果があった。頭位傾斜条件の影響を明らかにする

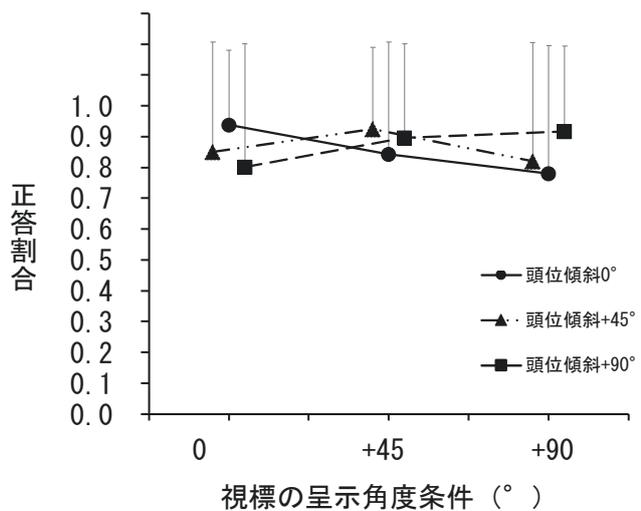


図 10. 頭位傾斜条件別のかな視標のサイズ条件と正答割合の変化
エラーバーは SD を示す

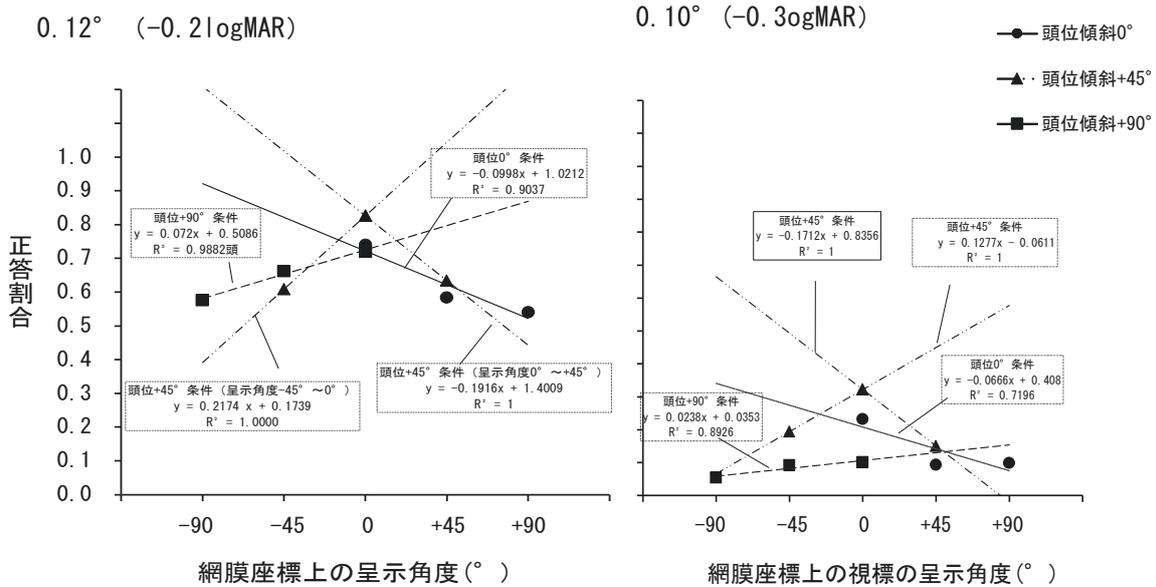


図 11. かな視標のサイズ条件別各頭位傾斜条件における網膜座標上の視標呈示角度に伴う正答割合の変化 (左 : 0.12° (-0.2 logMAR) 条件, 右 : 0.10° (-0.3 logMAR) 条件)

ために実験 2 と同様にかな視標のサイズ条件 0.12° (-0.2 logMAR, 小数視力 1.58) と 0.10° (-0.3 logMAR, 小数視力 2.0) について, かな視標の呈示角度を網膜座標上の呈示角度にし, 図 11 に近似直線を加えて示した。頭位傾斜+45°条件はどちらのかな視標サイズ条件でも網膜座標上 0°での正答割合が高く, かな視標の呈示角度が±45°回転すると正答割合が低下した。網膜座標上の呈示角度 0°では位傾斜+45°条件の正答割合が最も高くなったが, 頭位傾斜+45°条件は視標が 90° 回転する網膜座標上の呈示角度±90° 条件がなかった。頭位傾斜 0°条件は網膜座標上 0°で正答割合が有意に高く, 45°回転した時と 90°回転した時の正答割合の間に有意な差がなかった。頭位傾斜+90°条件は網膜座標上の呈示角度 0°が高く, かな視標の呈示角度が回転するごとに正答割合が低くなったが, 近似直線の傾きも他の条件より小さく, 視標のサイズ 0.10°条件では, 頭位傾斜+90°条件の正答割合が最も低くなり, 網膜座標上の呈示角度による有意差はなかった。

4-4. 考察

かな視標の同定課題では, 縞視標より実験参加者の視力の閾値に近い条件で頭位傾斜と視標の呈示角度の影響が生じたが, oblique 効果は生じることなく, 網膜座標上 0°での正答割合が最も高く, 視標の回転とともに正答割合が低下した。この結果は, 正立した刺激から, 刺激の回転角度の増加に伴い反応時間が増大するという心的回転課題の結果に類似した (Shepard & Metzler, 1971)。心的回転課題は, 回転によって文字パターンが同一か否かを回答する反応時間を測定するもので, 必要であれば文字を頭の中で回転させ, 照合する必要があるとされており, 文字やパターンの方位について先行情報を与えると回転の影響を受けなくなることから, 高次の機能の関わりがうかがわれるとされる (Cooper & Shepard, 1973 ; Just & Carpenter, 1976 ; 下條, 1981)。文字の同定は, 文字情報が入力されてから理解されるまでに, イメージの記録・特徴抽出・認知の 3つの過程を経る必要があるとされ (Lindsay & Norman, 1977), 高次の視覚野の関わりにより, V1 の情報処理の特徴を示す oblique 効果が生じなかったと考えられた。頭位傾斜+45° 条件はかな視標が 90° 回転する条件がなかったため, 回答が容易となったと考えられ, 実験参加者の内省からもこれが裏付けられた。頭位傾斜+90° 条件は実験 2 と同様に, かな視標のサイズ 0.10°条件で他の頭位傾斜条件より正答割合が低くなり, 網膜座標上 0° に呈示しても正答割合が高くならなかった。

5. 頭位傾斜と読み課題の呈示角度が正答割合に及ぼす影響（実験4）

5-1. 目的

実験2, 実験3の結果から頭位傾斜, 視標の呈示角度は正答割合に影響を及ぼし, 頭位傾斜 $\pm 90^\circ$ 条件(側臥位)での正答割合が低いことが明らかとなったが, どちらの実験においても実験参加者の閾値付近で影響が生じたため, 視標を十分に大きくし, 方位の手がかりを与えると頭位の傾斜や視標の呈示角度の影響はなくなるのではないかとこの疑問が生じる。そこで実験4では各実験参加者の臨界文字サイズを測定し, 十分に速いスピードで読める大きさの文字で読み課題を作成し, 頭位傾斜のない頭位傾斜 0° 条件と右下側臥位の頭位傾斜 $+90^\circ$ 条件で測定し比較検討した。

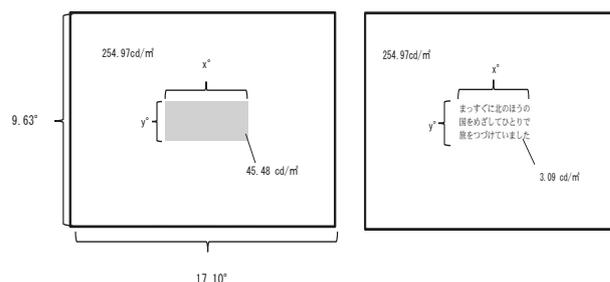


図12. 課題の1例 (0° 条件)

左：四角刺激, 右：読み課題刺激

5-2. 対象と方法

眼疾患ならびに眼位眼球運動に異常がなく, オートレフラクトメータでの他覚的屈折検査において乱視度数が $1.00D$ 以下, 裸眼での小数視力片眼 1.2 以上, 両眼 1.5 以上の大学生, 大学院生 8 名(平均年齢 21.8 ± 1.8 歳)。臨界文字サイズの決定は, ノートパソコン(実験3と同じ)でMNREAD-J(小田 et al., 1998)に準じて作成したMNREAD-Jで行なった。視標の作成・制御はすべて実験3と同じとした。刺激は, MNREAD-Jに準じて, 左から右へ1行10文字で3行の漢字かな交じりの文からなり, フォントはDFPHSMincho-W3を使用した読み課題刺激と方位の手がかりとして読み課題刺激と同形・同面積の四角形が描かれた四角刺激の2枚1組とし(図12), 1ブロック20組, 4セットを作成した。読み課題はすべて異なる文章で「10分で読める物語6年生」(青木, 2010)から抜粋した。文字呈示面は平均輝度 254.97 cd/m^2 の白字背景で, 文字は平均輝度 3.09 cd/m^2 の黒色, 四角刺激の平均輝度は 45.48 cd/m^2 , 文字コントラストはMichelson contrastで 97.6% とした。実験は, 明室で観察距離は 200 cm , 両眼開放下で行った。頭位傾斜条件は頭位傾斜 0° , $+90^\circ$ 条件, 視標の呈示角度条件は視標の呈示角度 0° 条件(図12)とそれを時計回りに 90° 回転させた視標の呈示角度 $+90^\circ$ 条件の2条件とした。四角刺激, 読み課題刺激の順に呈示し, ブロック内の頭位傾斜条件, 呈示角度条件は同一とし, 頭位傾斜条件, 呈示角度条件, 読み課題刺激の順序は, 実験参加者ごとにカウンターバランスを取った。同日に同じ文章を使用しないようにし, 実験の間隔は2日以上とした。各条件を4回繰り返し, 計320回測定した。実験参加者に, 読み課題をできるだけ速く読むこと, 間違えても読み返しをしないことを教示し, 実験の前に練習を十分に行い, 実験参加者が刺激の呈示方向を理解したことを確認した後, 実験に移行した。開始後, 四角刺激が呈示され, 実験参加者が実験開始可能であることを実験者に伝えると, 実験者はキーを押して, 読み課題を呈示した。実験参加者が音読をはじめるとともに時間計測が始まり, 読み終わると, 実験者がキーを押して計測を終了させた。終了すると次の四角刺激が呈示され, 20回繰り返されると1ブロックが終了した。四角刺激の呈示時間は制限を加えず, 実験参加者のペースで実験を進めた。実験者は音読時の誤読をチェックするとともに, 実験参加者の読みをICレコーダーで録音し確認した。読書速度はMNREAD-Jマニュアル(小田, 2002)に従い算出した。

5-3. 結果

頭位傾斜のない頭位傾斜 0° 条件と頭位傾斜 $+90^\circ$ 条件の読書速度について, 頭位傾斜条件 \times 呈示角

度条件の2要因の分散分析をおこなった。頭位傾斜条件 ($p < .001$), 呈示角度条件 ($p < .05$) とともに主効果が有意であった。頭位傾斜条件別の視標の呈示角度と正答割合の関係を図 13 に示した。どちらの頭位傾斜条件においても, 頭位傾斜角度と視標呈示角度が一致する網膜座標上 0° に呈示した条件での正答割合が高かったことから, 実験 2, 実験 3 と同様に視標の呈示角度を網膜座標上の呈示角度に替えて図 14 に示した。実験 4 では, 毎回練習試行を行い, 四角視標を方位の手がかりとして与えたが, どちらの頭位傾斜条件でも網膜座標上 $\pm 90^\circ$ に呈示した条件より, 網膜座標上 0° に呈示した条件の読書速度が速かった。網膜座標上 0° に呈示した条件では頭位傾斜条件による有意差はなかったが, 網膜座標上 $\pm 90^\circ$ に呈示した条件では, 頭位傾斜 0° 条件の読書速度が有意に速かった (ともに $p < .05$)。

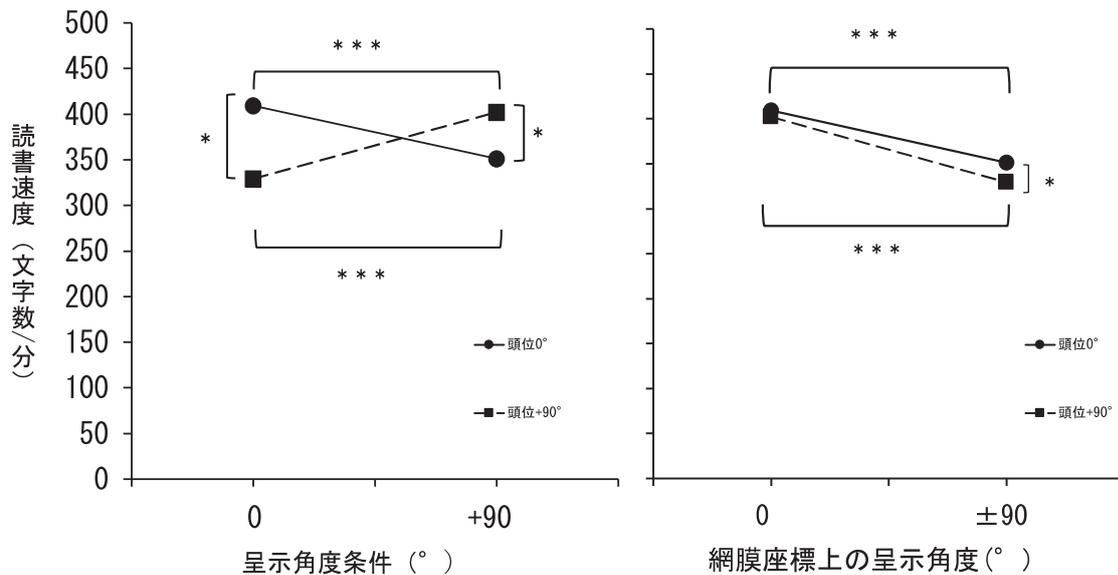


図 13. 頭位傾斜条件別の刺激の呈示角度条件と読書速度の関係

*** : $p < .001$, エラーバーは SD を示す

図 14. 頭位傾斜条件別の網膜座標上の呈示角度と読書速度の関係

*** : $p < .001$, * : $p < .05$

5-4. 考察

実験 4 では, 網膜座標上 0° に呈示した読み課題刺激の読書速度が網膜座標上 $\pm 90^\circ$ に呈示した読み課題刺激より有意に速いことが示された。本実験と同様に, 頭位傾斜のない座位と側臥位で単語を回転させて語彙同定課題を行った Davidenko & Ambard (2018) は, 網膜座標上 0° と 90° の間に有意な差がなかったとしている。本実験で 2 つの呈示角度条件に有意な差が認められた理由としては, 課題が左から右へ 10 文字, 上から下へ 3 列の読み課題であったことによる投影される網膜座標の違いが考えられる。網膜座標上 0° に呈示された条件では, 頭位傾斜条件に関わらず, 読み課題は, 網膜座標上, 左から右に 10 文字, 上から下へ 3 列そのまま投影されるが, 網膜座標上 $\pm 90^\circ$ に呈示された条件は, 頭位傾斜 0° 条件では, 網膜座標上, 上から下へ 10 文字, 右から左へ 3 列, 頭位傾斜 $+90^\circ$ 条件では, 下から上へ 10 文字, 左から右へ 3 列となり, 網膜座標軸の-から+ (下から上に) 呈示されたことが影響しているのではないかと考えられた。また, 単語と異なり (Davidenko & Ambard, 2018), 読み課題は 10 文字 3 行 30 文字であったことから, 眼球運動が必要で, 網膜座標上 0° に呈示された条件では眼球運動は左から右への水平の眼球運動であるが, 読み課題が 90° 回転すると上下の眼球運動が必要となり水平の眼球運動より複雑になる (福島, 1996)

ことも原因と考えられる。

一方、網膜座標上 0° に呈示された条件では、頭位傾斜条件による有意な差はなかった。実験 2、実験 3 で有意に正答割合が低い結果となった頭位傾斜 $\pm 90^\circ$ (側臥位) 条件が、実験 4 では、方位の手がかりを十分に与えたことで頭位傾斜がない頭位傾斜 0° 条件と同等の読書速度が得られたと考えられた。漢字かな交じりの読み課題は、かな視標と同様に、必要に応じて回転させ照合させる必要があるが、より高次からの働きかけ(構え)により、回転の影響がなくなったと考えられる (Cooper & Shepard, 1973)。

6. 総合考察

本研究は、肢体不自由の児・者が持つ、「姿勢の異常」が視力に及ぼす影響について検討した。健常者を対象に頭位傾斜のシミュレーションを行い、OCR を計測し、頭部が傾斜した時の網膜座標の傾きを明らかにし、縞視標・かな視標の正答割合、読み課題の読書速度を測定して実験的に検討した。実験 1 から実験 4 で得た知見をもとに「縞視標・かな視標・読み課題を刺激とした頭位傾斜時の視覚情報処理モデル」を作成した (図 15)。

視覚情報は網膜に投影され網膜像が決定される。その後、情報は視覚中枢に送られ処理が行われ、最終的に視覚認識(認知)される。本研究で提案するモデルは、この視覚情報処理に頭位の傾斜と視標の傾きが及ぼす影響を示したものである。「傾き情報」として、視標の傾きと頭位の傾きについて検討した。頭位の傾きは、網膜を傾斜させるとともに、耳石・半規管に送られ、前庭から前庭神経核を経て動眼神経核に伝わり、前庭動眼反射のひとつである OCR として網膜座標を頭位傾斜と反対側に回旋させる。頭位傾斜によって生じる OCR の割合は一定ではなく (Diamond & Markham, 1983; Hamasaki et al., 2005; 野村ら, 2000), 実験 1 では頭位傾斜 $+45^\circ$ 条件では 12.3%, 頭位傾斜 -45° 条 10.8%, 頭位傾斜 -90° 条件では 8.8%の OCR が計測された。頭位傾斜 -90° 条件では頭位の傾斜角度に比べ OCR の割合が少なく、ばらつきも大きかった。視標の傾きと頭位の傾き、OCR による傾き補正により網膜座標上の視標の傾き(網膜像)が決定され、網膜像は V1 に送られ、V1 では線の傾き、空間周波数が検出される。V1 は方位特異性 (Hubel & Wiesel, 1962, 1963, 1965; Li, Peterson, & Freeman, 2003) を持ち、水平・垂直軸に対して 45° 方向での情報処理能力が低いことが知られている (Appelle, 1972; 仲谷, 1991)。V1 で方位の検出をされた情報は、腹側系において複雑化された特徴抽出が行われ (花沢, 2022; Ungerleider & Mishkin, 1982), その後、側頭連合野に送られ視覚認識(認知)が行われる。

本研究の実験 2 で行った縞視標の方位弁別課題では網膜座標上 0° , $\pm 90^\circ$ を軸として oblique 効果が生じた (図 6)。縞視標の方位弁別課題の情報処理は V1 のレベルで終了し、V1 の処理の特性が修正されることなく出力されたと考えられるが、実験 3 のかな視標の同定課題では oblique 効果は認められず、網膜座標上 0° (垂直) からの回転角度の増大に伴い正答割合が低下した。かな視標の同定課題は、網膜座標上 0° を軸として、必要に応じて視標の傾きを回転(心的回転)させ、補正して照合する必要があるため、縞の方位弁別課題より高次での処理が行われていることが示唆され、高次の関わりにより V1 での処理の特徴である oblique 効果が生じなかったと考えられる。実験 4 では最大の読書速度が保てる最小の文字サイズである臨界文字サイズをあらかじめ実験参加者ごとに測定し、それより $0.1\log\text{MAR}$ 大きい文字サイズ(閾上)の漢字かな交じりの 10 文字 3 列の読み課題刺激を用いて読書速度を測定し、頭位傾斜 0° 条件と頭位傾斜 $+90^\circ$ 条件で比較した。実験 4 は、頭位傾斜と文字の呈示方向はブロックごとに一定とし、実験試行前に実験試行と同じ条件の練習試行を重ね、方位の手がかりを与えて実験を行った。実験 4 の読み課題は、実験 3 のかな視標と同様に網膜座標上 0° を基準に必要に応じて回転させ角度補正を行い、照合し同定されると考えられる

が、実験4では、読み課題の文字列の方位、枠組を示すことにより「構え」となり(Luchins, 1942)，網膜座標上 0° に呈示された条件では、側臥位である頭位傾斜 $+90^\circ$ 条件でも頭位傾斜 0° 条件と有意差のない読書速度が得られたと考えられる。しかし、網膜座標上 $\pm 90^\circ$ に呈示した条件では、方位の手がかりによる傾きの補正は十分ではなかったと考えられ、これらについては、眼球運動の測定を始め、今後の追加実験が必要と考えている。これらの結果から、頭位傾斜 $\pm 90^\circ$ 条件の正答割合の低下や読書速度の低下にOCRや自覚的視性垂直位が関与している可能性があると考えられる。

臨床応用については、本研究は健常者を対象としたことから、今回得られた知見が、肢体に不自由がある児・者にすべて当てはまるとは限らない。OCRは、頸定、脊髄や脳の障がいの影響を受ける可能性があり、今後、実際に肢体不自由のある児・者を対象に計測を行う必要がある。しかし、本研究の知見から、頭位傾斜のある人・児に視力検査、教育を行うにあたりいくつかの提言ができると考える。視標により、情報処理レベルが異なり、頭位傾斜がある児・者に視標や教材を提示する場合には、縞視標は網膜座標上 0° 、 $\pm 90^\circ$ に、文字視標は網膜座標上 0° に呈示すれば頭位傾斜のない条件と同じパフォーマンス（正答割合・読書速度）が得られる。側臥位を想定した頭位傾斜 $\pm 90^\circ$ 条件ではすべての呈示角度でパフォーマンスは低下するが、網膜座標上 0° に呈示し、方位の手がかりを示すことにより、座位で頭位傾斜のない条件と同等のパフォーマンスを得る可能性がある。しかし、網膜座標上 $\pm 90^\circ$ に呈示した条件では、方位の手がかりを示してもなお、パフォーマンスが劣る可能性が高い。そして、この頭位傾斜 $\pm 90^\circ$ （側臥位）で網膜座標上 $\pm 90^\circ$ に呈示する条件は、側臥位の児童・生徒が床に据えられた方ホワイトボードやプロジェクターをはじめとする視覚教材を見ている条件であることを留意しておく必要がある。

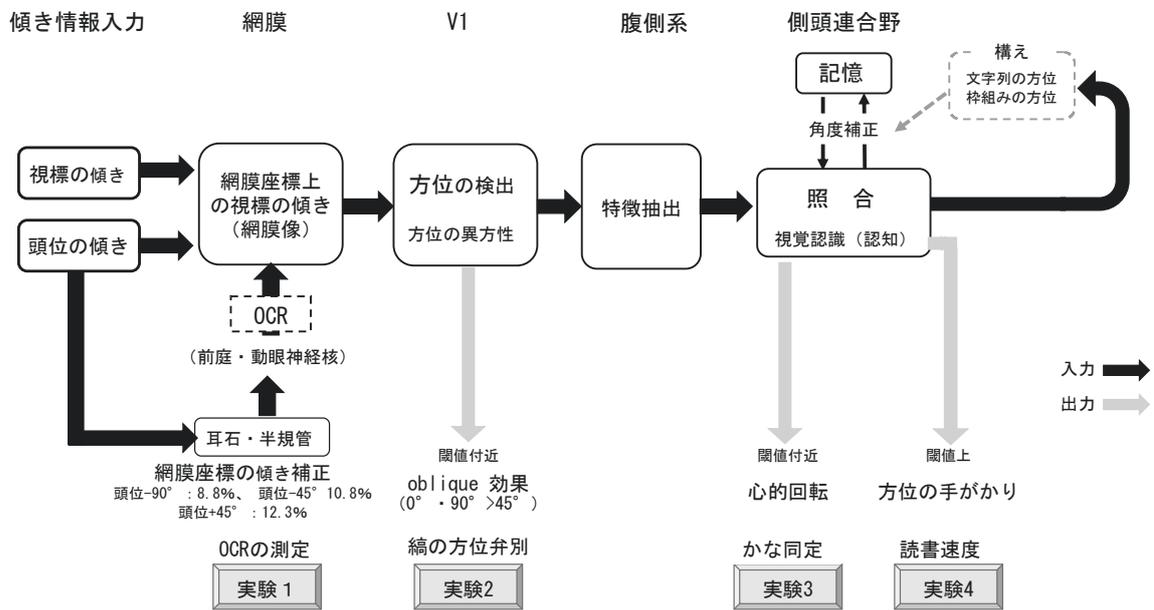


図 15. 縞視標・かな視標・読み課題を刺激とした頭位傾斜時の視覚情報処理モデル

7. 引用文献

- 青木 伸生 (選) (2010) . 10分で読める物語 六年生 学研プラス.
- Appelle, S. (1972). Perception and discrimination as a function of stimulus orientation: The “oblique effect” in man and animals. *Psychological Bulletin Journal*, 78(4), 266-278.
- Aubert, H. (1861). Eine scheinbare, bedeutende Drehung von Objecten bei Neigung des Kopfes nach rechts oder links. *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medizin*, 20, 381–393.
- Banks, S. M., & Stolarz, J. S. (1975). The effect of head tilt on meridional differences in acuity: Implications for orientation constancy. *Perception & psychophysics*, 17 (1), 17-22.
- Bockisch, C. J., & Haslwanter, T. (2001). Three-dimensional eye position during static roll and pitch in humans. *Vision Research*, 41(16), 2127-2137.
- Cooper, L.A., & Shepard, R. N. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. *Visual information processing. Academic Press*, 75-176.
- Davidenko, N. & Ambard, A. (2018). Reading sideways: Effects of egocentric and environmental orientation in a lexical decision task. *Vision Research*, 153, 7-12.
- Diamond, S. G., Markham, C. H., Simpson, N.E., & Curthoys, I. S. (1978). Binocular counterrolling in humans during dynamic rotation. *Acta Oto-Laryngologica*, 87, 490-498.
- Essock, E.A. (1980). The oblique effect of stimulus identification considered with respect to two classes of oblique effects. *Perception*, 9, 37-46.
- 福島 菊郎 (1996). 垂直性眼球運動のメカニズム 神経研究の進歩 40(3), 337-350.
- Guerraz, M., Poquin, D., Luyat, M., & Ohlmann, T. (1998). Head orientation involvement in assessment of the subjective vertical during whole body tilt. *Perceptual and motor skills*, 87(2), 643-648.
- Hamasaki, I., Hasebe, S., & Ohtsuki, H. (2005). Static ocular counterroll: video-based analysis after minimizing the false-torsion factors. *Japanese Journal of Ophthalmology*, 49(6), 497-504.
- 花沢 明俊 (2022). 神経生理Ⅱ—高次の視覚領野— 内川 恵二・篠森 慶三 (編) 視覚Ⅰ 視覚系の構造と初期機能 (pp.45-63) 朝倉書店.
- Howard, I. P. (1982). Human Visual Orientation. Jhon Wiley and sons, London.
- Hubel, D.H., & Wiesel, T.N. (1962). Receptive fields, binocular interaction, and functional architecture in the cat's visual cortex. *The Journal of Physiology*, 148, 574-591.
- Hubel, D.H., & Wiesel, T.N. (1963). Shape and arrangement of columns in cat's striate cortex. *The Journal of Physiology*, 165(3), 559-568.
- Hubel, D.H., & Wiesel, T.N. (1965). Receptive fields and functional architecture in two nonstriate visual areas (18 and 19) of the cat. *Journal of Neurophysiology*, 28(2), 229–289.
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1976). Eye fixations and cognitive processes. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 8, 139–143.
- Kheradmand, A., & Winnick, A. (2017). Perception of Upright: Multisensory Convergence and the Role of Temporo-Parietal. *Cortex. Frontiers in Neurology*, 8: 552. DOI: 10.3389/fneur.2017.00552.
- Kompanejets, S. (1928). Investigation on the counterrolling of the eyes in optimum head positions. *Acta Oto-Laryngologica*, 12, 332-335.
- 國弘 幸伸 (2004). 19.自覚的視性垂直位 (SVV) *Equilibrium Research*, 63(6), 533-548.
- Lennie, P. (1974). Head orientation and meridional variations in acuity. *Vision Research*, 14(1), 107–111.
- Li, B., Peterson, M.R., & Freeman, R. D. (2003). Oblique Effect: A Neural Basis in the Visual Cortex. *Journal of Neuroscience*, 90, 204-217.

- Lindsay, P.H., & Norman, D.A. (1977). *Human Information Processing: An Introduction to Psychology*. Second Edition. New York, Academic Press.
- A.S. (1942). Mechanization in problem solving: The effect of Einstellung. *Psychological Monographs*, 54(6), 1-95.
- Luria, S.M. (1963). The effect body-position on meridional variations in scotopic acuity. *The American Journal of Psychology*, 76(4), 598-606.
- 仲谷 兼人 (1981). Oblique 効果をめぐる諸問題 京都大学教育学部紀要, 27, 138-148.
- 野村 泰之・渡辺 佳治・五十嵐 眞・須藤 正道・関口 千春・石井 正則・小林 直樹 (2000). 長時間の側臥と眼球反対回旋 日本耳鼻咽喉科学会会報, 103(8), 916-921.
- 小川 恭生 (2020). 自覚的視性垂直位 *Equilibrium Research*, 79(4), 211-217.
- 小田 浩一 (2002). MNREAD-J, Jk チャートマニュアル. <https://www.cis.twcu.ac.jp/~k-oda/MNREAD-J/>. (June 3, 2023).
- 小田 浩一・今橋 真理子 (1995). 文字認知の閾値と読みの閾値. *VISION*, 7 (4), 165-168.
- 小田 浩一・Mansfield, J. S.・Legge, G, E. (1998). ロービジョンエイドを処方するための新しい読書検査表 MNREAD -J. 第7回視覚障害リハビリテーション研究発表人会論文集 157-160.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9, 671-675.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171(3972), 701-703.
- 下條 信輔 (1981). メンタル・ローテーション実験をめぐる～イメージ研究の方法論的一考察～心理学評論, 24(1), 16-42.
- Tarnutzer, A.A., Shaikh, A.G., Palla, A.R., Straumann, D., & Marti, S. (2011). Vestibulo-cerebellar disease impairs the central representation of self-orientation. *Frontiers in Neurology*, 2:11. DOI: 10.3389/fneur.2011.00011
- 内野 善生 (1993). 前庭核ニューロンの構成と機能 大山正・今井省吾・和気典二(編) 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック (pp.1319-1340) 誠信書房.
- Ungerleider, L.G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems, In Ingle, D. J., Goodale, A., & Mansfield, R.J. (Eds), *Analysis of Visual Behavior* (pp. 549-580). Cambridge, Mass.: MIT Press.

正誤表

本抄録 98 頁に下記の通り誤りがございました。お詫びして訂正いたします

頁	98 頁
正誤箇所	図 10 と図 10 のタイトル (下線部)

(誤)

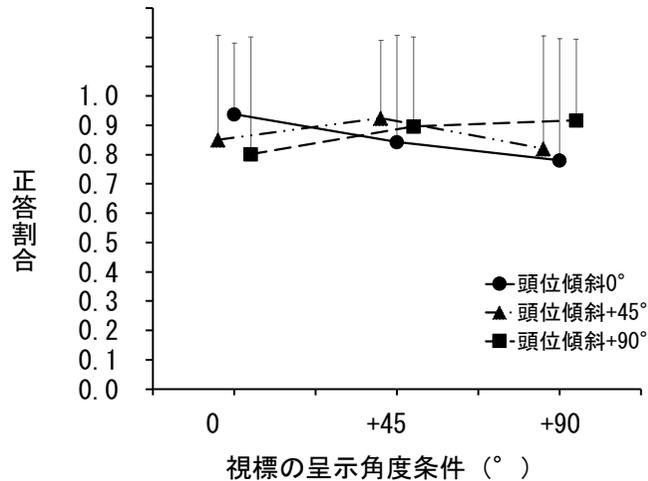


図 10. 頭位傾斜条件別のかな視標のサイズ条件と正答割合の変化
エラーバーは SD を示す

(正)

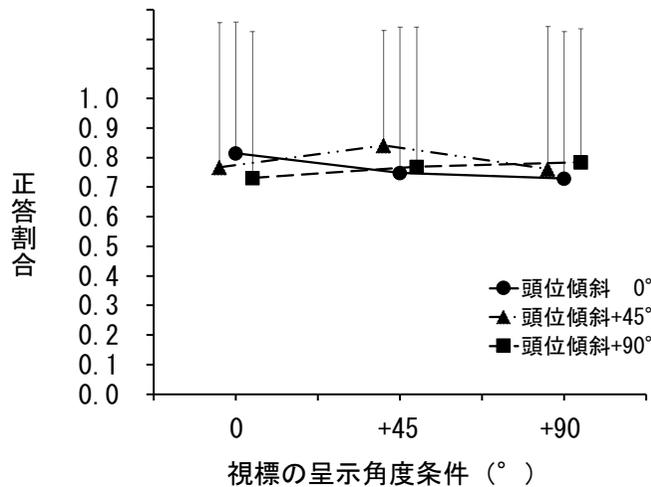


図 10. 頭位傾斜条件別のかな視標の呈示角度と正答割合の変化
エラーバーは SD を示す

頁	98 頁
正誤箇所	4-3 結果 7 行目

(誤) 頭位視 → (正) 視標

※正誤表は 2023 年 9 月 25 日追加されました。

健康医療科学研究 第 13 号 2023 p.91- p.105 [博士論文抄録]

頭位傾斜による網膜座標の傾きが視力に及ぼす影響 — 縮視標・かな視標・読み課題による実験的研究 —