

視覚誘導性自己運動知覚(ベクシオン)の潜時、強度に及ぼす 視力(logMAR)と誘導刺激の空間周波数の効果^{*,**}

宮田浩輔¹⁾・高橋啓介²⁾

The effects of visual acuity (logMAR) and spatial frequency of inducing stimulus upon the latency and the strength of visual induced self-motion (vection)

Kosuke MIYATA and Keisuke TAKAHASHI

白内障患者の姿勢保持が手術後に改善することが報告されており(Schwartz, Segal, Barkana, Schwesig, Avni, & Morad, 2005)、視覚入力に姿勢保持に影響する可能性がある。そこで本研究ではベクシオンを用いて、姿勢保持におよぼす視力の効果について検討した。ベクシオンの生起潜時、主観的強度(評定値)、客観的強度(姿勢保持)を従属変数とし、独立変数である視力を logMAR0.0~2.0(小数視力 1.00, ~0.01)に統制した。誘導刺激は 0.1~0.9 c/d の運動縞で、縞の呈示されない 0.0 c/d を統制条件とした。その結果、①ベクシオンの生起潜時は低視力で長くなり、その傾向は高空間周波数刺激で強くなる。②ベクシオンの主観的強度は高視力において弱くなり、その傾向は低空間周波数刺激で顕著となる。③姿勢保持については、実験参加者間で共通した明確な視力、誘導刺激の空間周波数の効果は認められなかった。ベクシオンの主観的強度と姿勢保持との間には直接的な関連性がないことが示唆された。

Keywords : ベクシオン, 姿勢保持, ベクシオンの主観的強度(評定値), ベクシオンの客観的強度, 低視覚
vection, posture stabilization, perceptual strength (rating) of vection, objective strength of vection, low vision

1. 問題

ベクシオンとは視野の大部分を占める広い領域で視覚刺激が均一に運動するのを観察した場合に、物理的には静止している自身が、視覚刺激とは反対方向に運動して知覚される現象である。ベクシオン自体は非常に古くから知られており、Mach(1875)は橋の上から川を観察した際に、その流れによって自己身体の運動感覚が誘導されることを報告している。また縦縞模様の円筒を回転させその内部を観察したり、2本のローラーの間に模様を描いた布を張り、それを動かすことによってベクシオンを誘導することにも成功している。ベクシオンは視覚情報が自己運動知覚に決定的な影響を及ぼしていることの証明と

*本研究の実施に当たり、愛知淑徳大学研究助成特定課題研究(22TT15)の助成を受けた。

**本研究は愛知淑徳大学健康医療科学部医療貢献学科視覚科学専攻研究倫理委員会の倫理審査において適合(健視倫理 2022-33号)の判定を受けた。

1) 愛知淑徳大学健康医療科学部医療貢献学科視覚科学専攻学部生

2) 愛知淑徳大学健康医療科学部医療貢献学科視覚科学専攻

して広く受け入れられており、自己身体運動知覚における視覚情報の役割を考える場合に重要な意味をもつ(中村, 2005)。

ベクシオンを定量的に評価する際に、現在までに主に3種類の主観的評価指標が用いられてきた(Seno, Sawaki, Kanaya, Wakebe, Ogawa, Fujii, & Palmisano, 2017)。ベクシオンの生起潜時と持続時間とのベクシオンの時間的側面に着目した指標と、ベクシオン強度の指標として、自己身体運動知覚の強度に対するマグニチュード推定値である。本研究では、ベクシオンの姿勢保持への影響を検討するために、姿勢保持の指標として、重心動揺と重心移動距離とを用いることとした(蘆田・藤本, 2022; 金澤・魚里, 2014; 藤本, 2022)。これらはベクシオン強度を客観的に定量化する指標である。これらの指標と従来から用いられてきた指標との関連性を検討するために、ベクシオンの時間的側面としては、ベクシオンの生起しやすさの指標として生起潜時を用い、ベクシオンの主観的強度の指標として、マグニチュード推定法に比べてモジュラスの呈示を必要とせずモジュラスの知覚的評価が不要で、より簡便な6段階評定法による評定値を用いることとした。

Swinging roomの実験(Lee & Aronson, 1974)では、幼児に対してベクシオンを誘発させる刺激を呈示し、その刺激に対する姿勢保持について検討し、約8割の幼児でふらつきや、転倒などの姿勢変化が認められた。このことは、姿勢制御系が未発達の幼児で、視覚的運動刺激が自己身体の定位や、姿勢制御に大きく影響を及ぼすことを端的に示している。また、Schwartz, Segal, Barkana, Schwesig, Avni, & Morad (2005)は、白内障患者に認められる身体動揺が手術による治療後に低減し、姿勢保持が良好となることを報告しており、成人においても視力の低下による視覚入力の変化が自己身体の定位や姿勢制御にネガティブな影響を及ぼすことが知られている。このように、姿勢制御機能が十分に発達している成人においても、視覚的運動刺激が自己身体の定位や姿勢制御に一定の影響を与えていると考えられる。ベクシオンは視覚運動の入力が自己身体の定位や姿勢抑制に影響することで生じると考えられ、成人においても、幼児ほど劇的ではなくとも、視力との関係でベクシオンの生起やその強度が変動する可能性が考えられる。また、ベクシオンの知覚強度に対応するベクシオンの知覚速度と誘導刺激の空間周波数、時間周波数、運動速度との間には線型的な関係があることが知られており(Suvan & Bonnet, 1993)、さらに、ベクシオンの知覚速度は、誘導刺激の空間周波数や時間周波数ではなく、運動速度に依存することが報告されている(de Graaf, Wertheim, Bles, & Kremers, 1990)。しかし、本研究で検討する独立変数の一つである視力は、言うまでもなく空間分解能であり、その低下は誘導刺激の空間周波数の検出に影響を及ぼす。したがって、ベクシオンに及ぼす視力の効果を検討するためには、誘導刺激の運動速度を一定に保った上で、誘導刺激の空間周波数の効果について検討する必要があるだろう。そこで本研究ではベクシオンの生起潜時、ベクシオンの主観的強度、ベクシオンの客観的強度(重心動揺および重心移動距離)に及ぼす視力と誘導刺激の空間周波数との効果について検討した。視力については弱視治療用眼鏡箱(以下、バンガーター・フィルター)(リイサー)を用いて実験参加者の視力をlogMAR 0.0~2.0(小数視力 1.00~0.01)の範囲で操作し、logMAR 0.7, 2.0(小数視力, 0.30, 0.01)は低視覚のシミュレーションとしての低視力条件とした。また、本研究では、誘導刺激として正弦縞ではなく、矩形の細い縞(太さ, 視角 0.7°)を用いた。空間周波数的に変則的な誘導刺激を用いたのは、予備観察において、最も良好にベクシオンを惹起させる刺激を誘導刺激として採用したことによる。

上述の通り、本研究では、ベクシオンに及ぼす視力と誘導刺激の空間周波数との効果を検討することによって、視覚入力と姿勢保持との関係について検討を行った。

2. 方法

2.1. 実験参加者

両眼の矯正視力がlogMAR 0.0(小数視力 1.00)以上で、両眼視機能が良好な大学生および大学院生の女

子3名(平均年齢22.67歳, SD=1.69)であった。

2.2. 装置

重心軌跡測定器(T.K.K.5810:竹井機器工業;図1(竹井機器工業HPより転載))。本測定器は、体の静的な平衡性を測定する4点支持型の測定装置で、付属プログラムによって重心移動軌跡図や重心移動軌跡長、重心移動軌跡面積などが算出できる装置である。刺激提示モニターは(L420UA:サイズ78.1°×49.1°, 解像度1920×1080pix:NEC)を用いた。視力を統制するためにバンガータ・フィルター(リイサー)で統制を行った。実験制御に用いるパソコンはOmen 15t 3NS58AV_1(日本HP)であった。

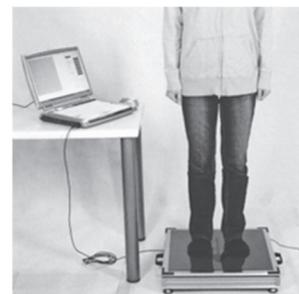


図1 重心軌跡測定器

2.3. 刺激

ベクション誘導刺激は太さ視角0.7°の白色矩形線分の上辺、左辺、右辺から構成される縞刺激が上辺はモニター上方へ、左辺はモニター左方へ、右辺はモニター右方へ、長さを1秒当たり9倍の拡大率で拡大しながら運動することで、縞刺激が前方から接近してくるよう知覚される刺激であった。この刺激を観察することで実験参加者は、自身が前方に運動しているようなベクションを知覚した。刺激を図2に示した。刺激の輝度は背景(黒)2.14 cd/m², 縞(白)156.46 cd/m²で、コントラストはマイケルソン・コントラストで

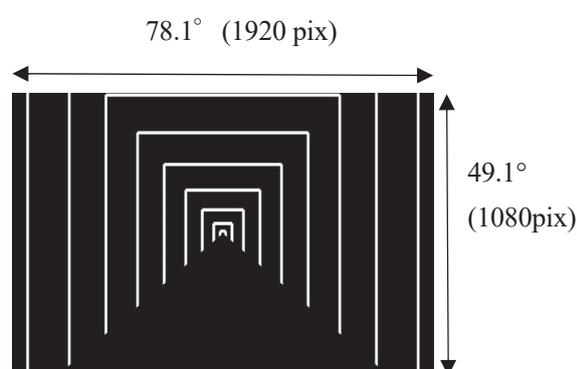


図2 刺激

97.30%であった。縞(白)の太さは視角0.7°で空間周波数は0.1 c/d~0.9 c/dで設定した。これを9.0 d/sの速度でモニター中央から周辺に向かって各辺各方向に拡大運動させた。したがって、刺激の時間周波数は1.0 Hz~8.0 Hzであった。縞の運動速度は実験を通して一定とした。刺激下方の三角形の大きさは底辺64.3°×高さ25.5°、頂角は108.6°であった。刺激はPsychoPy 2022.3.1 (Open Science Tools Ltd.; Peirce & MacAskill, 2018)で作成し、制御した。

2.4. 実験条件

視力条件としてlogMAR 0.0(小数視力1.00), logMAR 0.2(小数視力0.60), logMAR 0.7(小数視力0.30), logMAR 2.0(小数視力0.01)の4条件を設定し、ベクション誘導刺激の空間周波数として、0.0 c/d, 0.1 c/d, 0.2 c/d, 0.4 c/d, 0.9 c/dの5条件を設定した。視力条件は、バンガーター・フィルターを用いて各実験参加者の視力値を制御した。World Health Organization(WHO:世界保健機関)では低視覚を視力の良い方の眼の矯正視力で小数視力0.05(logMAR 1.3)~小数視力0.30(logMAR 0.5)未満と定義していることから(視覚障害の認定基準に関する検討会, 2016), 本研究ではlogMAR 0.7, 2.0を低視覚に対応する低視力条件とした。

ベクション生起潜時とベクションの主観的強度に対しては、空間周波数条件として、誘導刺激が呈示されないためにベクションが生じず、測定データが取得できない0.0 c/d条件を除いた4水準について分析することとし、各実験参加者について、視力4水準×誘導刺激の空間周波数4水準×繰り返し4回の2要因分散分析実験計画とし、ベクションの客観的強度である重心動揺と重心移動距離については、誘導刺激の空間周波数0.0 c/dでの測定データの取得が可能であり、分析条件に含め、各実験参加者について、

視力4水準×誘導刺激の空間周波数5水準×繰り返し4回の2要因分散分析実験計画とした。

2.5. 手続き

本実験では、ベクシヨンの生起潜時、ベクシヨンの主観的強度、ベクシヨンの客観的強度(重心動揺および重心移動距離)とを従属変数とした。ベクシオン生起潜時は、誘導刺激が呈示されてから、実験参加者がベクシオンを知覚するまでの時間とし、実験者がストップ・ウォッチを用いて測定した。ベクシヨンの主観的強度は「0:全く進んでいると感じない」～「5:非常に前に進んでいると感じる」の6段階評定尺度の評定値とした。重心動揺は、重心軌跡測定装置による身体前後方向の重心移動距離の平均値であり、前方への移動を正の値、後方への移動を負の値として算出した。重心移動距離は全方向の重心移動の総距離であった(蘆田・藤本, 2022; 金澤・魚里, 2014; 藤本, 2022)。

実験に先立って、実験参加者ごとに視力条件で用いるバンガーター・フィルターの度数を決定するために視力検査を行い、実験参加者ごとに各視力条件となるようフィルターを決定した。各実験参加者ともバンガーター・フィルターを用いない条件で視力がlogMAR0.0以上であることを確認した。本実験では、バンガーター・フィルターを用いない条件を一律にlogMAR0.0条件として扱うこととした。

実験参加者を、ブランク状態のモニター中央に対面するように重心軌跡測定装置上に立たせ、実験者からの口頭による合図によって、モニターに呈示されるベクシオン誘導刺激を57.3cmの観察距離で観察させ、ベクシオンが知覚されたら即座に口頭で報告させた。ベクシオン誘導刺激の呈示時間は64秒間で、各実験条件について4試行の測定を繰り返した。測定は実験条件、試行繰り返しについてフル・ランダムな順序とした。1試行の測定が終了した段階でベクシヨンの主観的強度を「0:全く進んでいると感じない」から「5:非常に前に進んでいると感じる」の6段階評定尺度で評定させた。

3. 結果

ベクシオン生起潜時とベクシヨンの主観的強度については、実験参加者ごとに誘導刺激が呈示され、視力4水準×誘導刺激の空間周波数条件のうち、0.0 c/d条件を除く4水準×繰り返し4回の2要因分散分析と単純主効果検定およびholm法による多重比較の結果に基づいて整理、検討を行った。また、重心動揺と重心移動距離については、実験参加者ごとに視力4水準×誘導刺激の空間周波数5水準×繰り返し4回の2要因分散分析と単純主効果検定およびholm法による多重比較の結果に基づいて整理、検討を行った。

3.1 ベクシオン生起潜時

すべての実験参加者で誘導刺激呈示条件下ではベクシヨンの知覚が生じた。

図3に各実験参加者のベクシオン生起潜時の視力に伴う変化を示した。エラーバーは片側1.0SDを示す。

分散分析の結果、すべての実験参加者で視力条件の主効果が有意であり(A: $F(3,48)=7.17, p < .001$; B: $F(3,48)=9.56, p < .001$; C: $F(3,48)=25.56, p < .001$)、図3および統計検定結果によると、実験参加者B、CでlogMAR 2.0条件で他の視力条件と比べて生起潜時が有意に長くなった(いずれも $p < .001$)。実験参加者AではlogMAR 0.2条件条件で他の視力条件に比べて生起潜時が有意に短かった(いずれも $p < .0001$)。すべての実験参加者を通して、logMAR 2.0条件で生起潜時が長くなった。

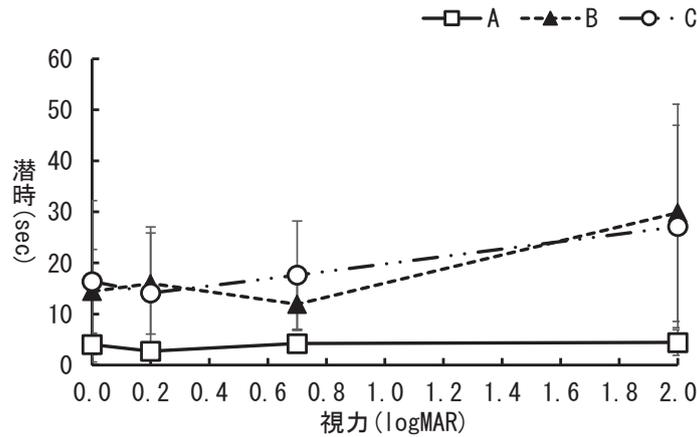


図3 各実験参加者のベクシオン生起潜時の視力に伴う変化

図4に各実験参加者のベクシオン生起潜時の誘導刺激の空間周波数に伴う変化を示した。エラーバーは片側1.0SDを示す。

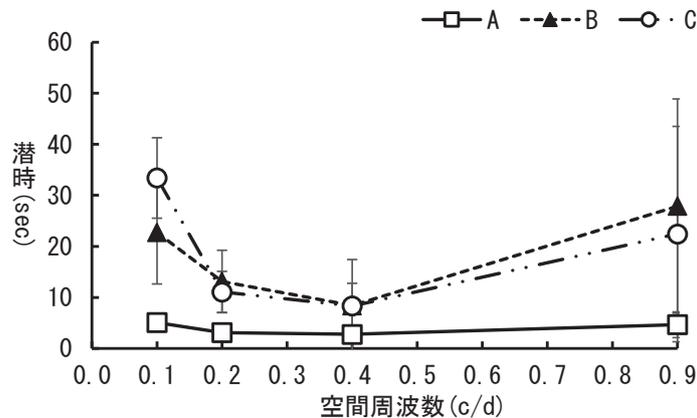


図4 各実験参加者のベクシオン生起潜時の誘導刺激の空間周波数に伴う変化

分散分析の結果、すべての実験参加者で誘導刺激の空間周波数の主効果が有意であった(A: $F(3,48)=17.47$, $p < .001$; B: $F(3,48)=38.24$, $p < .001$; C: $F(3,48)=28.63$, $p < .001$)。図4および統計検定結果によると、すべての実験参加者で、空間周波数条件 0.2 c/d, 0.4 c/dにおいて、空間周波数条件 0.1 c/d, 0.9 c/d に比べて生起潜時が有意に短くなった(いずれも $p < .001$)。

図5に各実験参加者の誘導刺激の各空間周波数条件におけるベクシオン生起潜時の視力に伴う変化を示した。エラーバーは片側1.0SDを示す。すべての実験参加者で視力と誘導刺激の空間周波数との交互作用が有意であり(A: $F(9,48)=7.25$, $p < .001$; B: $F(9,48)=9.77$, $p < .001$; C: $F(9,48)=9.54$, $p < .001$)、誘導刺激の空間周波数によってベクシオン生起潜時に対する視力の効果が異なることが示された。単純主効果検定および多重比較の結果と図5によると、すべての実験参加者で空間周波数条件 0.9c/d で logMAR 2.0 の生

起潜時が他の視力条件に比べて有意に長くなった(いずれも $p < .001$)。また、空間周波数条件 0.1 c/d において、実験参加者 A では、logMAR 2.0 条件で logMAR 0.0, 0.7 条件に比べて(いずれも $p < .01$)、また、実験参加者 B では、logMAR 2.0 条件が logMAR 0.0 条件に比べて生起潜時が有意に短くなった($p < .05$)。logMAR 2.0 では、低空間周波数で生起潜時が短くなり、高空間周波数で潜時が長くなるのが実験参加者間で一貫した傾向として認められた。

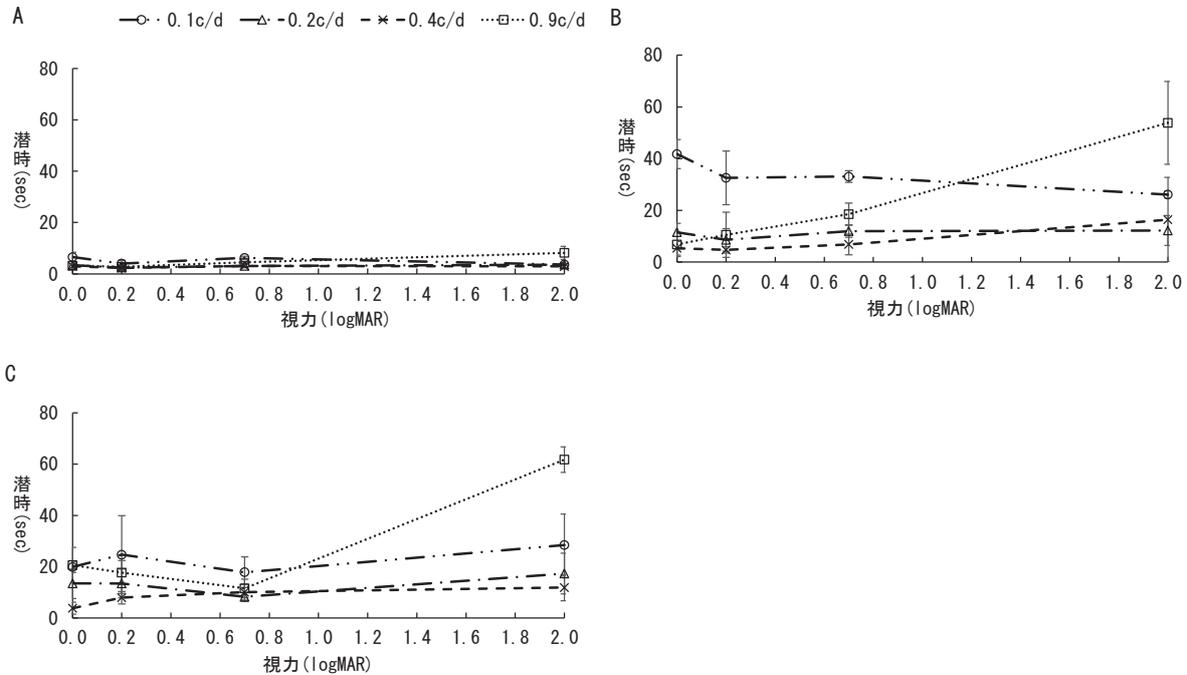


図5 各実験参加者の誘導刺激の各空間周波数条件におけるベクシオン生起潜時の視力に伴う変化

すべての実験参加者で logMAR 0.0 条件において空間周波数条件 0.1 c/d で潜時が長くなり(いずれも $p < .001$)、実験参加者 A, B では logMAR 0.7 条件においても、また実験参加者 B では logMAR 0.2 条件においても同様に空間周波数条件 0.1 c/d で生起潜時が有意に長くなり(いずれも $p < .05$)、実験参加者 C では、logMAR 0.2 条件で空間周波数条件 0.1 c/d が 0.4 c/d より生起潜時が有意に長くなった。さらに、すべての実験参加者で logMAR 2.0 条件において、空間周波数 0.9 c/d の生起潜時が他の空間周波数に比べて有意に長くなった(いずれも $p < .05$)。

上記のように、いずれの実験参加者でも高視力では空間周波数が相対的に低い場合に、logMAR 2.0 の低視力では、誘導刺激の空間周波数が相対的に高い場合に、ベクシオン生起潜時が長くなる傾向が認められた。

3.2 ベクシオンの主観的強度

分散分析の結果、すべての実験参加者でベクシオンの主観的強度(評定値)に対する視力の主効果が有意であった(A: $F(3,48)=14.70, p < .001$; B: $F(3,48)=11.30, p < .001$; C: $F(3,48)=27.44, p < .001$)。図6に各実験参加者のベクシオンの主観的強度(評定値)の視力に伴う変化を示した。エラーバーは片側 1 SD を示す。図6および統計検定結果によると、すべての実験参加者で logMAR 2.0 条件で他の視力条件に比べてベクシオンの主観的強度が有意に低くなるのが示された(いずれも $p < .05$)。

分散分析の結果、すべての実験参加者でベクシオンの主観的強度(評定値)に対する誘導刺激の空間周波数の主効果が有意であった(A: $F(3,48)=83.30, p < .001$; B: $F(3,48)=107.30, p < .001$; C: $F(3,48)=105.29, p < .001$)。

図 7 に各実験参加者のベクシオンの主観的強度(評定値)の誘導刺激の空間周波数に伴う変化を示した。エラーバーは片側 1 SD を示す。図 7 および統計検定結果によれば、いずれの実験参加者においても、誘導刺激の空間周波数条件 0.1 c/d でのベクシオンの主観的強度(評定値)が他の空間周波数条件と比べて有意に低く(いずれも $p < .001$)、空間周波数条件 0.4 c/d でのベクシオンの主観的強度(評定値)が他の空間周波数条件に比べて有意に高かった(いずれも $p < .001$)。

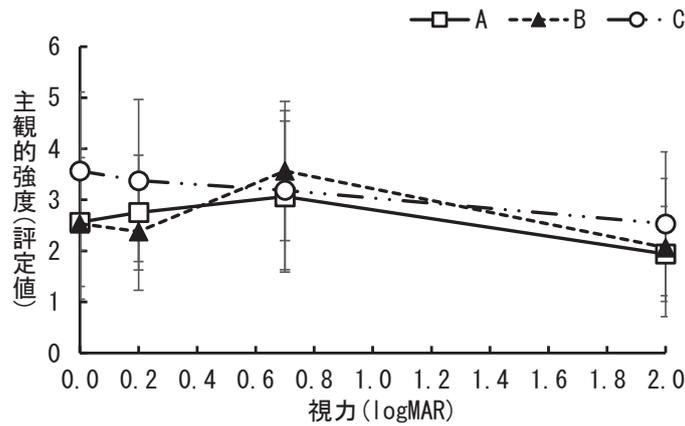


図 6 各実験参加者のベクシオンの主観的強度(評定値)の視力に伴う変化

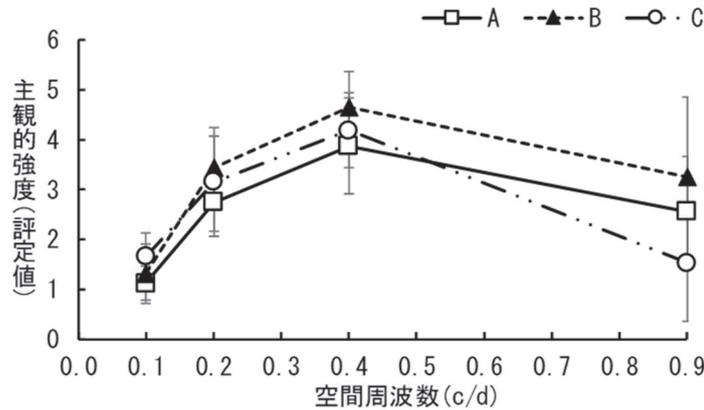


図 7 各実験参加者のベクシオンの主観的強度(評定値)の誘導刺激の空間周波数に伴う変化

図 8 に各実験参加者の誘導刺激の各空間周波数条件におけるベクシオンの主観的強度(評定値)の視力に伴う変化を示した。エラーバーは片側 1 SD を示す。

すべての実験参加者で視力と誘導刺激の空間周波数との交互作用が有意であり(A: $F(9,48)=7.21, p < .001$; B: $F(9,48)=17.96, p < .001$; C: $F(9,48)=8.27, p < .001$)、誘導刺激の空間周波数によって、ベクシオンの主観的強度(評定値)に対する視力の効果が異なることが示された。また、単純主効果検定および多重比較の結果と図 8 によると、すべての実験参加者で、空間周波数条件 0.4 c/d、0.9 c/d において、logMAR 2.0 条件でのベクシオンの主観的強度(評定値)が他の視力条件より有意に低くなること示された(いずれも

$p < .05$)。実験参加者 A, C で、空間周波数条件 0.2 c/d において logMAR 0.7 条件で他の視力条件と比べてベクシヨンの主観的強度(評定値)が有意に高かった($p < .05$)。

実験参加者 A, B では、logMAR 0.0, 0.7, 2.0 条件において、また、実験参加者 C では、logMAR 0.0, 2.0 条件において空間周波数条件 0.4 c/d の主観的強度(評定値)が高く(いずれも $p < .05$)、logMAR 0.7 条件において空間周波数条件 0.2 c/d, 0.4 c/d で主観的強度(評定値)が他の空間周波数条件に比べて有意に高かった。また、実験参加者 B, C で logMAR 2.0 条件において空間周波数条件 0.9 c/d のでの主観的強度(評定値)が他の空間周波数条件に比べて有意に低く、実験参加者 A で、logMAR 2.0 条件において空間周波数条件 0.9 c/d での主観的強度(評定値)が空間周波数条件 0.2 c/d, 0.4 c/d に比べて有意に低かった(いずれも $p < .05$)。

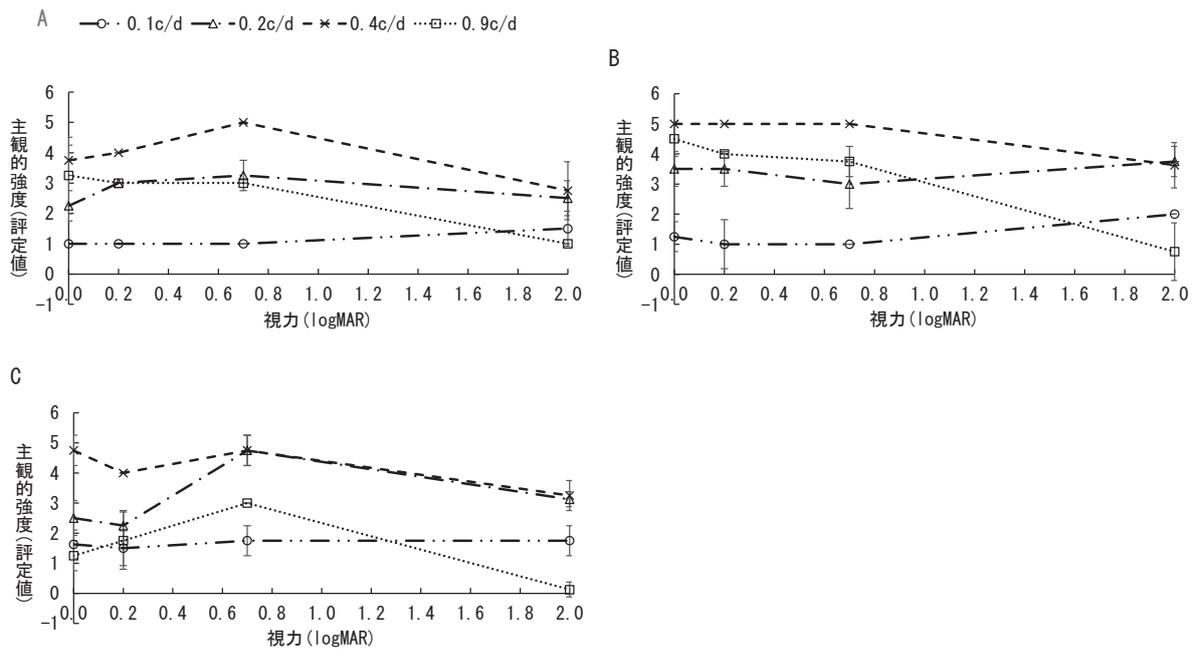


図 8 各実験参加者の誘導刺激の各空間周波数条件におけるベクシヨンの主観的強度(評定値)の視力に伴う変化

上記の通り、視力条件に関わらず空間周波数条件 0.4 c/d でベクシヨンの主観的強度(評定値)が最も高くなる強い傾向が認められた。また、すべての実験参加者で、高視力条件においては低空間周波数でベクシヨンの主観的強度(評定値)が低くなることが示された。

3.3 姿勢保持(ベクシヨンの客観的強度)

客観的なベクシヨン強度の指標として重心軌跡測定装置で測定された重心動揺と重心移動距離の2つの測度を用いた。重心動揺は身体の前後方向の重心移動距離の平均値であり前方への移動を正の値、後方への移動を負の値として算出した。重心移動距離は全方向への重心移動の総距離である。

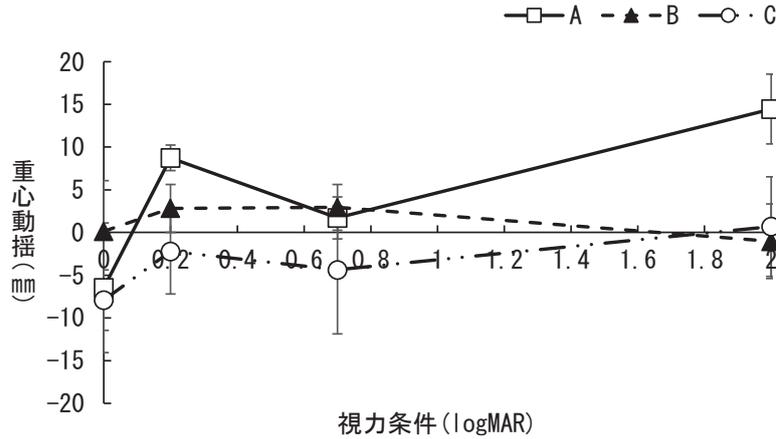


図9 各実験参加者の重心動揺の視力条件に伴う変化

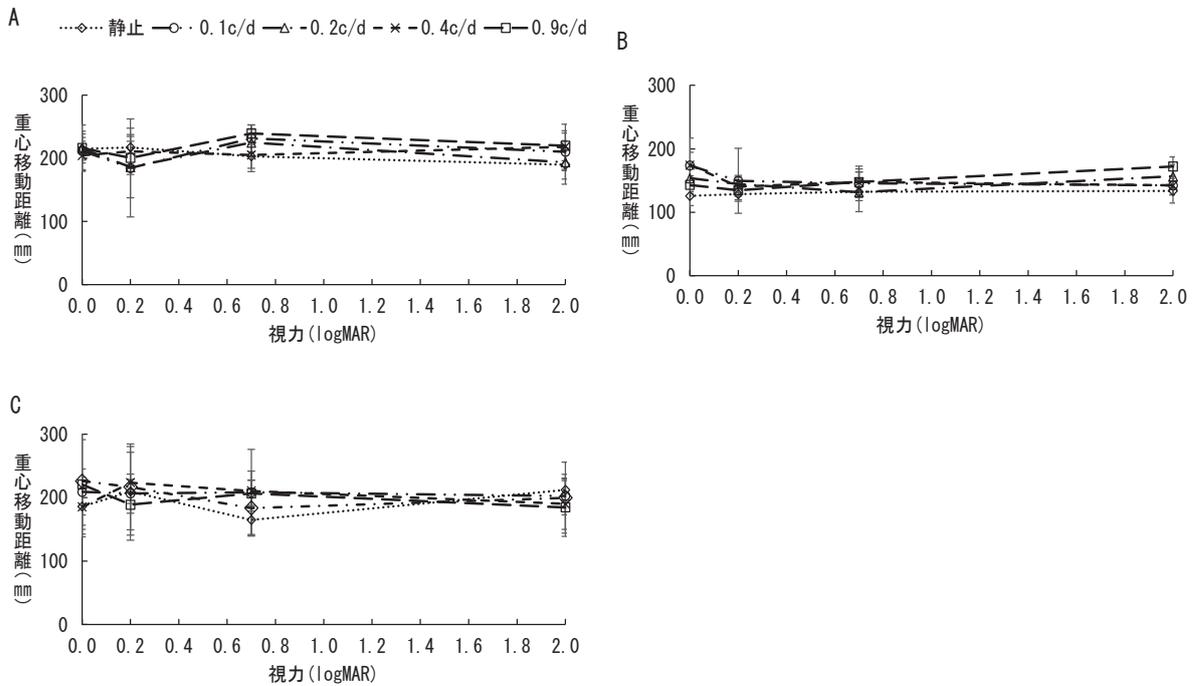


図10 実験参加者の誘導刺激の各空間周波数における重心移動距離の視力に伴う変化

分散分析の結果、実験参加者 A, B で重心動揺に対する視力条件の主効果が有意であった (A: $F(3, 60)=5.83, p < .01$; B: $F(3, 60)=2.90, p < .05$)が、誘導刺激の空間周波数の主効果、視力と誘導刺激の空間周波数との交互作用は有意ではなかった。また、実験参加者 C では有意な要因効果は認められなかった。

図9に、各実験参加者の重心動揺の視力に伴う変化を示した。エラーバーは片側1SDを示す。実験参加者 A では、logMAR 0.7 条件において logMAR 0.0, 0.2, 2.0 の視力条件と比較し重心動揺が有意に小さくなった(いずれも $p < .001$)。実験参加者 B では logMAR 0.2, 0.7 条件で他の視力条件に比べて重心動揺が大きくなる傾向が認められた。しかしながら、図9に示されているように、重心動揺に対する視力条件の効果には実験参加者間で一貫しておらず、明確な傾向は認められなかった。

図10に各実験参加者の誘導刺激の各空間周波数における重心移動距離の視力に伴う変化を示した。エラーバーは片側1SDを示す。

分散分析の結果、実験参加者A, Cでは、視力、空間周波数の主効果、両要因の交互作用のいずれも有意ではなかった。実験参加者Bでは、誘導刺激の空間周波数条件の主効果が有意であり($F(4,60)=3.01, p < .05$)、空間周波数条件0.0 c/dにおいて他の空間周波数条件と比べて重心移動距離が有意に短いことが示された(すべて $p < .05$)。視力条件の主効果、視力と誘導刺激の空間周波数との交互作用は有意ではなかった。

重心動揺、重心移動距離のいずれにおいても、データの個人差が大きく、独立変数に対する明確な傾向は認められなかった。

4. 考察

本実験ではバンガーター・フィルターを用いて、logMAR視力を0.0, 0.2, 0.7, 2.0(各小数視力1.00, 0.60, 0.30, 0.01)の4水準設定し、ベクシオン誘導刺激の各空間周波数(0.0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.9 c/d)におけるベクシオン生起潜時、ベクシオン強度、姿勢保持の視力に伴う変化を検討した。視力条件の内、logMAR 0.7, 2.0条件は低視覚のシミュレーションとしての低視力条件であった。

実験の結果、logMAR 2.0の視力条件でベクシオン生起潜時が有意に長くなった(図3)。内観報告によると、logMAR 2.0条件でベクシオン誘導刺激の運動縞を知覚するのが難しいとの報告が多数あり、視力低下による誘導刺激の検出の劣化がベクシオンの生起を阻害したと考えられる。また、視力条件に関わらず、0.2 c/d, 0.4 c/dの誘導刺激の空間周波数条件において、ベクシオンの生起潜時が有意に短かった(図4)。さらに、ベクシオン生起潜時に対する視力と誘導刺激の空間周波数との交互作用が有意であり、logMAR 2.0の視力条件では、誘導刺激の空間周波数条件0.9 c/dでのベクシオン生起潜時が有意に長くなり(図5)、低視力では誘導刺激が高空間周波数であると、ベクシオンのonsetが相対的に遅くなること示された。このことは、誘導刺激の速度が一定に制御された条件下で、ベクシオン生起が誘導刺激の空間周波数に依存する側面があり、誘導刺激の空間周波数の効果が視力との関で変化することを示唆する。本実験では、誘導刺激の運動速度は一定で、誘導刺激の空間周波数と時間周波数とは共変関係にあったため、上記の効果が誘導刺激の空間周波数によるものであることは確定的に結論づけることはできず、この点についてはさらなる検討が必要である。

次に、ベクシオンの主観的強度については、logMAR 2.0条件でベクシオンの主観的強度が有意に低くなり(図6)、logMAR 2.0の視力条件でベクシオン生起潜時が有意に長かったこと(図3)を考慮すると、視力低下がベクシオン生起潜時とベクシオンの主観的強度とに逆相関の関係で効果を与えることが示され、ベクシオンのonsetと知覚強度とに線形的な関係があることが示唆された。また、視力条件に関わらず、誘導刺激の空間周波数条件0.1 c/dで主観的強度が有意に低く、0.4 c/dにおいて主観的強度が有意に高くなること示され(図7)、生起潜時と同様に、誘導刺激の速度一定下では、ベクシオンの主観的強度が空間周波数に依存する側面のあることが示唆された。この傾向は、ベクシオンの主観的強度に対する視力と誘導刺激の空間周波数の交互作用が有意であったことによっても確認できる。logMAR 2.0の視力条件では空間周波数条件0.9 c/dでベクシオン強度が有意に低くなり(図8)、視力の変化によって誘導刺激の空間周波数によるベクシオンの主観的強度に対する影響が異なることが示された。

ベクシオン強度に対応するベクシオンの知覚速度は誘導刺激の時空間周波数のそれぞれに独立して依存するというよりは、誘導刺激の速度に依存するとの先行知見(de Graaf et al., 1990)に対して、本研究の結果は、視力低下によって、ベクシオンの主観的強度が誘導刺激の空間周波数に依存する側面のあることを示唆するものである。本研究では誘導刺激の時空間周波数の効果を分離できていないので、この点については、誘導刺激の時空間周波数と速度とを組織的に操作して、詳細に検討する必要がある。

姿勢保持については、重心動揺(図9)、重心移動距離(図10)のいずれも実験参加者間の個人差が大きく、視力、誘導刺激の空間周波数のいずれの要因についても、実験参加者間で一貫した傾向は認められなかった。しかしながら、市川・渡邊(1991)は自己の運動感と重心位置の変動との相関関係を求めた実験を行い、その両変数間には相関係数 0.673 の正の相関があると報告しており、また、Lestinne, Scechting, & Berthoz(1977)は、周辺視野にチェッカー・パターンを呈示し、3次元方向へのベクシオンが惹起されると、誘導刺激の運動方向と同方向への姿勢の傾斜が生じることを報告している。このように、適切な実験設定を行うことで、ベクシオンの知覚強度と姿勢保持との関係を検討できる可能性がある。成人におけるベクシオンによる姿勢変動は、多くの場合、縞刺激ではなく optical flow を用いた実験(蘆田・藤本, 2022, 市川・渡邊, 1991)において報告されており、ベクシオンの生じる方向、より強度の高いベクシオンを惹起する誘導刺激を用い、さらに、十分な繰り返し測定を行うことで、先行知見との比較検討に耐え得るデータの蓄積が可能であると考えられる。

本研究の結果、ベクシオンの生起潜時や主観的強度は、誘導刺激の運動速度一定下では、視力との関係で誘導刺激の空間周波数に依存する可能性が示唆され、生理光学系の要因が関与することで、ベクシオン強度の誘導刺激の刺激特性依存性について、先行研究に対して新たな知見を追加し得る可能性が示された。他方、ベクシオンの客観的強度の指標である姿勢保持については、ベクシオンの知覚との直接的な関係性は見いだされず、この点については、さらに検討を進める必要があることが示された。

5. 引用文献

- 蘆田宏・藤本花音(2022). 拡大縮小オプティックフローによる頭部移動と圧力中心移動の比較
VISION, 34(4), 139.
- de Graaf, B., Wertheim, A. H., Bles, W., & Kremers, J.(1990). Angular velocity, not temporal frequency determines circular vection. *Vision Research*, 30(4), 637-646.
- 藤本花音(2022). バーチャルリアリティ環境における空間人認識と姿勢制御メカニズムの検討 京都大学学位論文
- 市川真澄・渡邊 悟(1991). 直立姿勢に対する視覚情報の影響. *バイオメカニズム学会誌*, 15(2), 59-64.
- 金澤正継・魚里博(2014). 視覚情報を応用した重心動揺検査研究の現状. *視覚の科学*, 35(4), 75-78
- Lee, D. N. & Aronson, E.(1974). Visual proprioceptive control of standing in human infant. *Perception & Psychophysics*, 15(3), 529-532.
- Lestinne, F., Scechting, J., & Berthoz, A.(1977). Postural readjustments induced by linear motion of visual scene. *Experimental Brain Research*, 25, 363-384.
- Mach, E.(1875). *Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen*. Leipzig: Engelmann.
- 中村信次(2005). 視覚誘導性自己運動知覚(ベクシオン). 後藤倬男・田中平八 錯視の科学ハンドブック, 東京大学出版会, 273-283.
- Peirce, J. & MacAskill, M. (2018). *Building experiments in PsychoPy*. SAGE, Los Angeles.
- Sauvan, X. M. & Bonnet, C. (1993). Properties of curvilinear vection. *Perception & Psychophysics*, 53(4), 429-435.
- Schwartz, S., Segal, O., Barkana, Y., Schwesig, R., Avni, I., & Morad, Y. (2005). The effect of cataract surgery on postural control. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 46, 920-924.
- Seno, T., Sawaki, K., Kanaya, H., Wakebe., T., Ogawa, M., Fujii, Y., & Palmisano, S. (2017). The oscillating potential model of visually induced vection. *I-Perception*, 8(6).1-24.
- 視覚障害の認定基準に関する検討会 (2016). 視覚障害認定基準の改訂に関する取りまとめ報告書 厚生労働省労働省, 1-37.

(2023年 2月 7日 受付)
(2023年 4月 10日 受理)