

フロー錯視における時間周波数の影響

大橋佑香¹⁾・高橋伸子²⁾

Effect of temporal frequency on the furrow illusion

Yuka OHASI and Nobuko TAKAHASHI

フロー錯視とは、傾いた静止縞の背景上を垂直に運動する刺激を周辺視で観察すると運動刺激の軌跡が縞の傾きに引き寄せられて縞に沿って運動しているように知覚される現象であり、Allard & Faubert (2016) の報告によると、運動刺激を 7.5Hz で点滅させるとフロー錯視が消失する。本研究では、フロー錯視における時間周波数の影響を明らかにするため、運動刺激の時間周波数を 0~20Hz まで変化させ、時間周波数が見えの移動方向に与える影響について検討した。実験の結果、(1) 時間周波数 10Hz~12Hz をピークに見えの移動方向が縞の傾きに対して直交方向となり、(2) 運動刺激の内部運動が固視点から遠ざかる条件で見えの移動方向がより直交方向に知覚されるが、(3) 見えの移動方向が直交方向に知覚されるのは運動刺激の内部運動による影響でないことが明らかになった。

Keywords : フロー錯視, 点滅, 時間周波数, 周辺視

furrow illusion , flashing , temporal frequency , peripheral vision

1 はじめに

Anstis (2012) によると、フロー錯視 (furrow illusion) とは静止している傾いたり曲がったりしている縞模様の背景上を、直線的に運動する刺激を周辺視で観察すると、軌跡が縞模様を引き寄せられて、背景の模様に沿って運動しているように知覚される現象である。フロー錯視は背景の縞と極性を反転させた運動刺激により錯視量が増大することが知られており、この場合は刺激内部の局所運動信号の方向と、運動刺激全体の位置変位の方向が一致しないため、両方の手がかりを組み合わせることにより物理的運動方向からの強いずれが知覚されると考えられている (Anstis, 2012)。

Anstis (2012) は中心視と周辺視のフロー錯視への影響を調べるために、偏心度を独立変数とし、見えの移動方向の錯視量を測定した。実験 1 では円形の運動刺激が用いられ、直径 16° の縞模様の円背景上に直径 1° の背景と極性を反転させた縞模様で円状の運動刺激を円の背景刺激の上端から 3° の位置より 12deg/s の速度で 10° 降下したのち、再び開始点に戻る往復運動を繰り返した。固視点は円背景の中心から水平に 0° , 4° , 8° , 16° , 24° の 5 つの偏心度、縞の傾きは 45° , -45° (135°) の 2 条件で、各条件ランダム化して呈示された。被験者の課題は固視点上の調整可能な線分の向きを円状の運動刺激の見えの運動方向に合わせることであった。実験の結果から、中心視での錯視量は 0° で物理的運動方向に知覚され、偏心度が大きくなるほど錯視量が大きくなり、偏心度 24° で背景縞に対してほぼ平行に知覚されるフロー錯視が生じることが示された。周辺視では視力が低下するため、中心視で人工的に視力を低下させて実験を行ってもフロー錯視はみられなかったため、視覚的な運動方向の処理において中心視と周辺視の反応が異なることが示唆された。

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

Allard & Faubert (2016) は垂直に往復運動する運動刺激に 67ms (7.5Hz) の時間的ギャップ (ブランク) を加えて運動刺激を点滅させるとフロー錯視が消失し, 運動刺激の軌道が物理的運動方向に知覚されることをデモンストレーションによって示し, 点滅によって見えの移動方向が異なることを示唆した。

Allard & Faubert (2016) のデモンストレーションでは運動刺激の点滅条件は 7.5Hz のみであり, 実験データは示されなかった。そこで本研究ではフロー錯視の時間周波数を変化させて見えの移動方向を測定し, フロー錯視における時間周波数の影響について検討する。

2 実験1: フロー錯視における時間周波数の影響

2.1 目的

フロー錯視において, 時間周波数が異なるとき, 見えの移動方向に影響が生じるのか調べることを目的とする。時間周波数に加え, 縞の傾きと刺激呈示位置を変化させて見えの移動方向を測定する。

2.2 方法

i 被験者

矯正視力 1.0 以上の 22 歳の女子大学生 4 名。

ii 装置・刺激

実験で使用した刺激例を図 1 に示した。運動刺激は直径 2° の円で, 直径 12° の円形の背景刺激の上端から 3.3° の位置より 6.0deg/sec の速度で 3.8° 降下したのち再び開始点に戻り, 下降運動を繰り返した。背景刺激, 運動刺激ともに 1cycle/deg の矩形波で, コントラストは 0.99 (最高輝度 101.2cd/m^2 , 最低輝度 0.39cd/m^2), 運動刺激と背景刺激の位相は常に反転させた。縦横 1.4° の十字型の固視点から背景刺激までの中心間距離は 20° であった。Lu & Sperling (1995) より運動刺激の時間周波数が $0.94\text{Hz} \sim 15\text{Hz}$ の範囲で明確な運動を知覚することができることから, 範囲内の $1\text{Hz} \cdot 2\text{Hz} \cdot 3\text{Hz} \cdot 5\text{Hz} \cdot 7.5\text{Hz} \cdot 10\text{Hz} \cdot 12\text{Hz}$ の 7 段階に, 範囲外の 0Hz (点滅なし) $\cdot 0.5\text{Hz} \cdot 16\text{Hz} \cdot 20\text{Hz}$ を加え, 計 11 条件を設定した。点滅は円形の運動刺激の位相反転で, 運動刺激と背景刺激の位相が同じときは運動刺激はなく, 背景のみ呈示された。背景刺激の縞の傾きは $45^\circ \cdot 135^\circ$ (図 2), 刺激の呈示位置は固視点の右・左の 2 条件であった。刺激は画面サイズ $48.5^\circ \times 31.6^\circ$, フレームレート 60Hz , $1920\text{pix} \times 1200\text{pix}$ の解像度の液晶モニタ (HP. EliteDesk 800 G2 SFF) 上に Psychopy (ver.3.0.3) を用

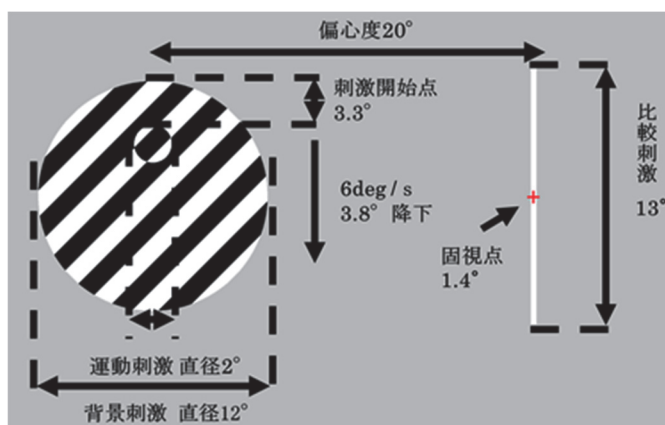


図 1 本研究で使用した刺激の呈示例 (縞の傾き 45° , 刺激呈示位置左)

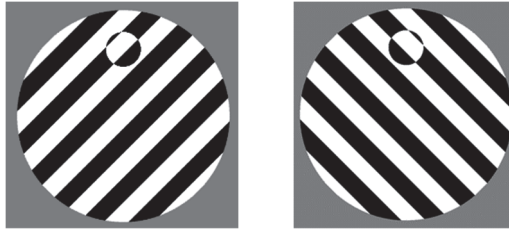


図2 刺激の傾き条件の例（左 45°，右 135°）

いて呈示した。顔の位置を固定するために顎台（竹井機器工業株式会社 TKK9 30a）を使用した。

iii 手続き

被験者は実験開始前に実験についての説明を受けた上で研究参加の同意を得た。実験は両眼開放で視距離 57.3 cm，暗室で行った。刺激は，各試行で被験者が刺激の見えの移動方向を回答するまで呈示され，被験者は調整法により固視点の位置に設置した比較刺激（図 1 右のバー）の角度を調節することにより運動刺激の見えの移動方向を回答した。各被験者について時間周波数条件（11）×縞の傾き条件（2）×刺激呈示位置条件（2）×繰り返し（8）352 試行をランダム順に呈示した。

iv 倫理的配慮

本研究は，本学健康医療科学部倫理委員会の承認を得て実施した（承認番号 健視倫理 2021-13 号）。

2.3 結果と考察

フロー錯視における時間周波数の影響について調べるために，刺激の見えの移動方向を測定した。運動刺激の見えの移動方向は物理的運動方向（垂直方向）を 0° とし，背景刺激の縞に対して平行である場合は $+45^\circ$ ，直交方向である場合は -45° として処理した。図 3 に被験者 4 名の時間周波数と見えの移動方向の関係を示す。時間周波数と縞の傾きと刺激呈示位置について 3 要因分散分析を行ったところ，時間周波数の主効果は，被験者 4 名全員に認められた（ $F(10,351)=91.258, p<.001$ （被験者 KF）， $F(10,351)=51.135, p<.001$ （被験者 NK）， $F(10,351)=28.979, p<.001$ （被験者 MO）， $F(10,351)=99.908, p<.001$ （被験者 MI））。被験者 4 名の時間周波数についての多重比較の結果より，0Hz～2Hz，3Hz，5Hz と 20Hz，7.5Hz と 16Hz，10Hz と 12Hz の順に見えの移動方向が有意に減少することが示され，見えの移動方向は時間周波数が 0Hz～2Hz のとき縞に沿う平行方向に知覚され，10Hz～12Hz をピークに縞に対して直交方向に知覚され，12Hz～20Hz で再び平行方向への知覚に近づく傾向であることがわかった。これらの結果より時間周波数 0Hz の点減なし条件では運動刺激が縞に沿って平行方向に知覚され，フロー錯視が生じ，7.5Hz では見えの移動方向が約 0° で物理的運動方向と等しかったことから，Allard & Faubert (2016) を支持する結果であると考えられる。Anstis & Cavanagh (2018) によるとフロー錯視を生じる運動刺激にブランクを入れて一度点減させると，ブランク後の刺激はもとの物理的な運動位置に知覚され，その物理的位置から再び運動が生じる。すなわち見えの移動方向が点減により物理的位置にリセットされ，フロー錯視が減じると考えられる。しかし，本研究の時間周波数が 10Hz～12Hz の条件では見えの移動方向は物理的運動方向よりさらにマイナス方向，すなわち縞に対して直交方向に知覚されることが示され，点減による物理的リセットでは説明できない。Shioiri & Cavanagh (1990) は仮現運動する 2 つの縞刺激間に平均輝度のブランク画面を 17ms (29Hz)～67ms (7.5Hz) のブランクとして挿入すると運動方向が逆向きに知覚される現象（reverse apparent

motion) を報告している。本研究の運動刺激の内部運動は縞の傾きに直交する方向であるため縞の傾き 45° 条件では 135° 方向 (斜め左上方向), 縞の傾き 135° 条件では 45° 方向 (斜め右上方向) の局所運動方向であり, 物理的運動方向を 0° , 背景縞の傾き $+45^\circ$ とする見えの移動方向においてはいずれも $+135^\circ$ 方向, 点滅により運動刺激の内部運動に reverse apparent motion が生じたとすると, -45° 方向になる。見えの移動方向の結果は, 物理的移動方向である 0° に局所的な内部運動方向 ($+135^\circ$) が影響することにより縞に沿う平行方向 ($+45^\circ$) に知覚されたのに対し, 点滅による逆向きの内部運動 (-45°) により直交する方向 (-45°) に知覚されたと解釈できる。reverse apparent motion は二相性の神経応答により点滅による内部運動の方向が逆向きになることにより生じる現象で, この現象に基づき見えの移動方向が変化したと考え, 内部運動がない場合には直交方向に知覚されない可能性が考えられる。そこで実験 2 においては, 運動刺激のパターンとして平均輝度の単色の刺激を用いて, 刺激内部の縞がフロー錯視にどのような影響を及ぼしているのか検討する。

縞の傾きと刺激呈示位置の交互作用については 4 名の被験者とともに認められた ($F(1,351)=7.045$ $p<.01$ (被験者 MI), $F(1,351)=60.401$, $p<.001$ (被験者 KF), $F(1,351)=9.163$, $p<.01$ (被験者 MO),

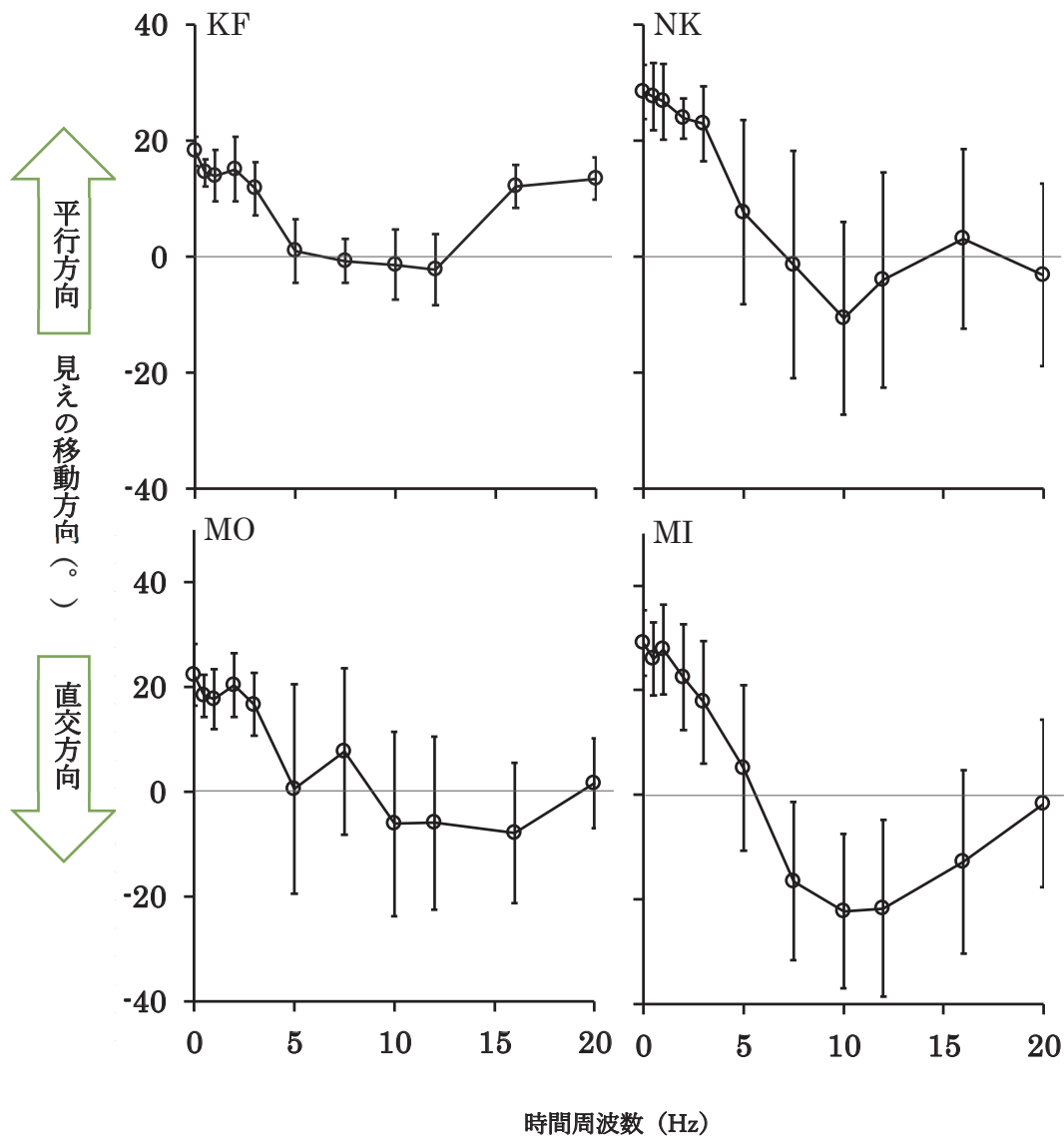


図3 各被験者における時間周波数と見えの移動方向 (エラーバーは標準偏差)。

$F(1,351)=86.350, p<.001$ (被験者 MI)。図 4 に 4 名の被験者の縞の傾きと刺激呈示位置と見えの移動方向の関係を示す。図 4 よりすべての被験者について刺激を左に呈示すると縞の傾き 135° で、右に呈示すると 45° で見えの移動方向がより平行方向すなわち縞に沿うフロー錯視方向に知覚される傾向が示された。縞の傾きと呈示位置の交互作用について単純主効果検定を行った結果、刺激の呈示位置が左のときは、MO 以外の 3 名の被験者で縞の傾きが 135° の方が 45° より有意に見えの移動方向が平行方向に知覚され、右のときは KF 以外の 3 名の被験者で 45° の方が 135° より有意に平行方向に知覚されることが示された。これは固視点方向に向かって内部の縞が運動する条件で見えの移動方向がより平行方向へ知覚されることを示す。Shioiri & Cavanagh (1990) によれば $7.5\text{Hz}\sim 29\text{Hz}$ の点滅時の内部運動は逆方向に知覚されると考えられるため、固視点に向かう内部運動方向は点滅により固視点から離れる運動方向になると考えられる。また、Anstis (2012) によるとフロー錯視の偏心度が大きくなるほど物理的運動方向からのずれが大きくなることが判明しているため、点滅時に内部運動方向が固視点から離れる運動は、フロー錯視の錯視量が大きくなる、すなわちより背景縞に平行方向に知覚されると解釈できる。

時間周波数と縞の傾きと刺激呈示位置の交互作用について、被験者 4 名のうち、被験者 NK と被験者 MI に有意差が認められた ($F(10,351)=4.253, p<.001$ (被験者 NK), $F(10,351)=51.135, p<.001$ (被験者 MI))。図 5 に被験者 4 名の刺激呈示位置別・縞の傾き別の時間周波数と見えの移動方向の関係について示した。被験者 NK と MI の時間周波数と傾きと呈示位置の多重比較より、呈示位置が左であるとき NK では $5\sim 12\text{Hz}$, MI では $1\text{Hz}, 2\text{Hz}, 5\text{Hz}, 7.5\text{Hz}, 12\text{Hz}$ の時間周波数で縞の傾きに有意差が認められ、呈示位置が左であるときに中間的な時間周波数条件で縞の傾きが 45° より 135° の方が見えの移動方向が有意に高く、より平行方向に知覚されることが示された。一方呈示位置が右側であるとき NK で $7.5\text{Hz}, 12\text{Hz}$, MI では $5\text{Hz}\sim 20\text{Hz}$ の時間周波数で縞の傾き間に有意差が認められ、呈示位置が右であるときに縞の傾きが 135° より 45° の方が有意に見えの移動方向がより平行方向に知覚されることが示された。これらの結果は縞の傾きと刺激呈示位置の交互作用で示された、運動刺激の

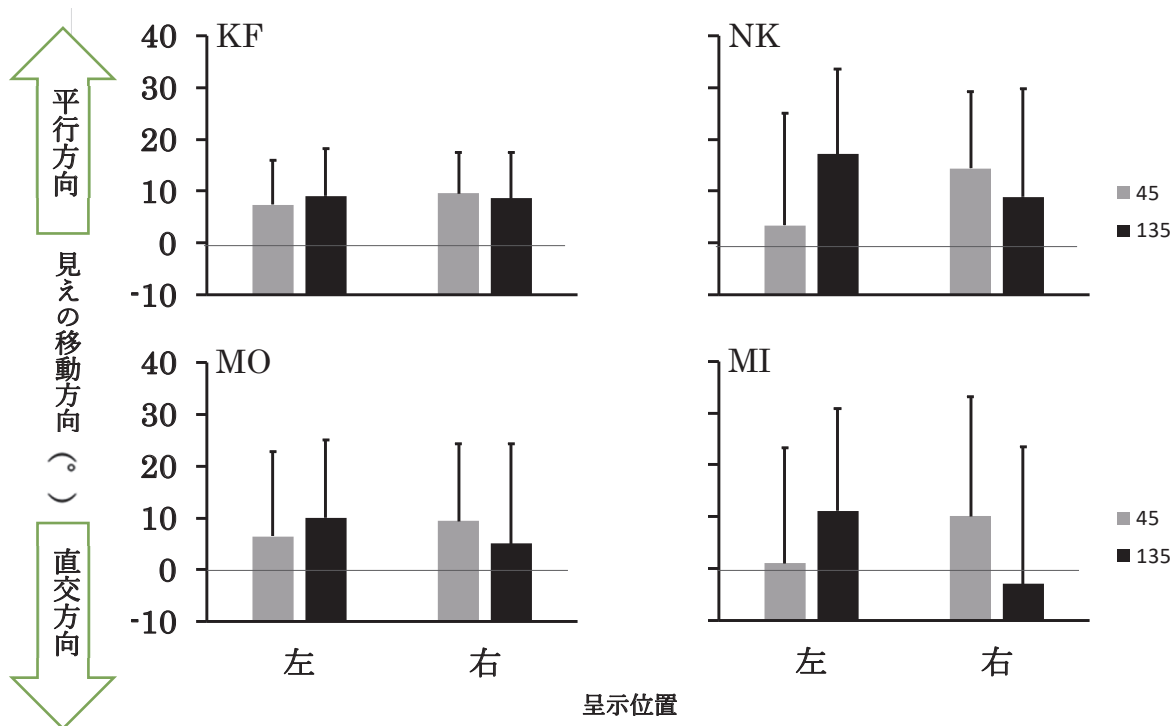


図 4 縞の傾きと刺激呈示位置における見えの移動方向の関係 (エラーバーは標準偏差)。

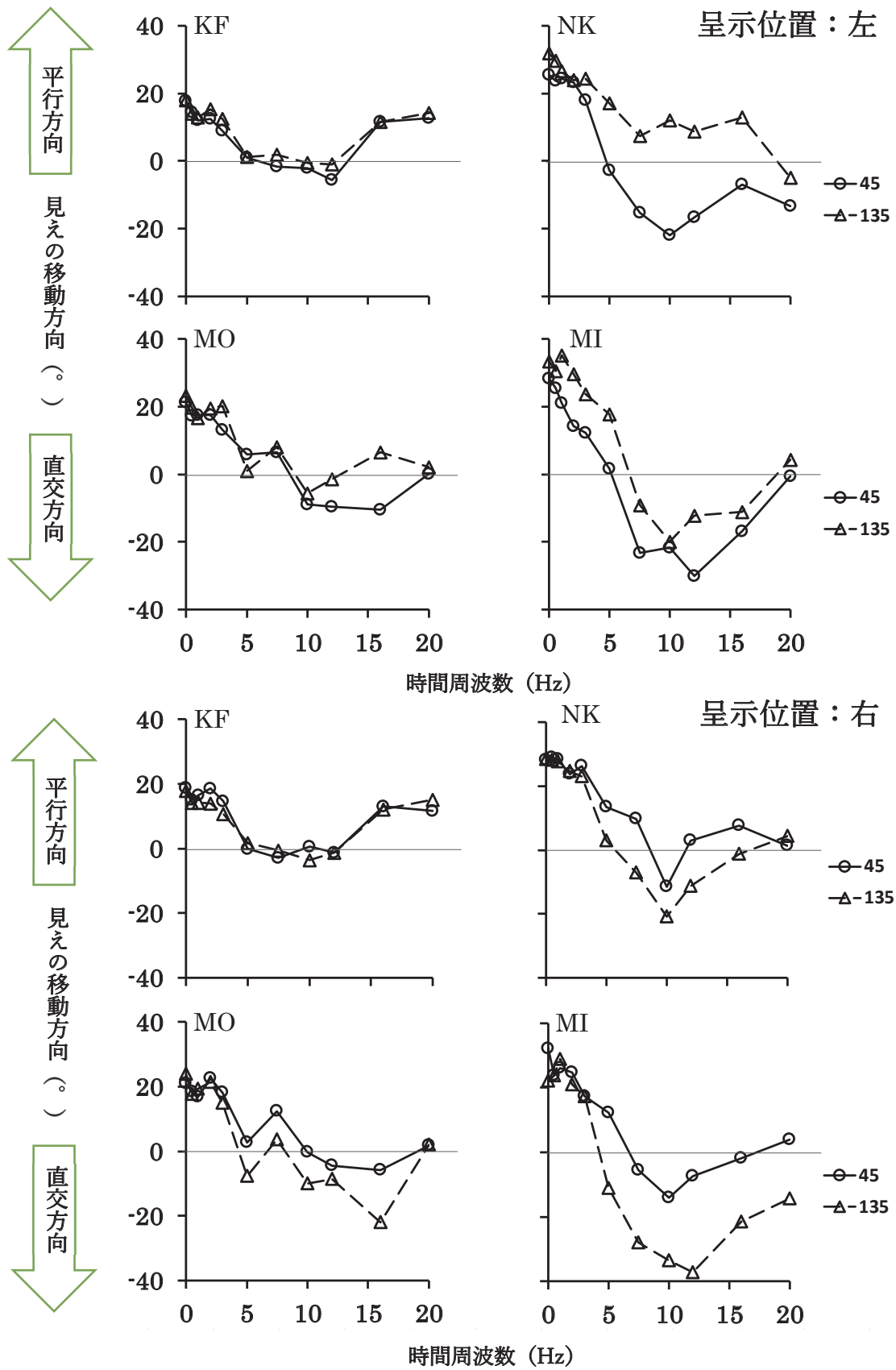


図5 各被験者における呈示位置別・縞の傾き別の時間周波数と見えの移動方向の関係

内部運動方向が固視点に向かう方向のときに見える移動方向がより平行方向に知覚される傾向が時間周波数により異なり、時間周波数が低い条件では認められないことを示す。

3 実験2：フロー錯視における内部運動と時間周波数の影響

3.1 目的

実験1では時間周波数を変化させることにより見える移動方向が直交方向に知覚されることが示された。点滅により直交方向に向かう運動が知覚されるのは縞の内部運動の影響を受けている可能性が考えられるため、実験2では刺激を単色で呈示することにより内部運動の影響の有無を検討する。実験2においては、運動刺激のパターンとして、実験1と同じ背景縞の位相反転縞刺激に加えて、縞の平均輝度の単色の灰色刺激を用い、見える移動方向を測定して刺激内部の縞の有無がフロー錯視にどのような影響を及ぼしているのか検討する。運動刺激の時間周波数は実験1で見える移動方向が縞に平行方向に知覚された0Hzと、直交方向に知覚された10Hzを採用し、運動刺激のパターン条件、縞の傾き条件、がフロー錯視に及ぼす影響について検討する。

3.2 方法

被験者、装置、実験手続き、倫理的配慮は実験1と同様であった。運動刺激の内部は実験1と同じ背景刺激の位相反転縞の縞刺激（図6左）に加え、縞刺激の平均輝度と等しい50.80cd/m²の単色の灰色刺激（図6右）の2種類あり、これをパターン条件として設定した。運動刺激の時間周波数条件は点滅あり（10Hz）となし（0Hz）の2条件で、実験1と同様の方法で呈示した。刺激呈示位置は固視点の左に固定し、背景刺激の縞の傾きは実験1と同様に45°・135°を設定した。パターン条件（2）×時間周波数条件（2）×傾き条件（2）×繰り返し（8）の計64試行をランダム順に呈示した。

3.3 結果と考察

フロー錯視における運動刺激の内部運動の影響について調べるために、刺激の見える移動方向を測定した。運動刺激の見える移動方向は物理的運動方向（垂直方向）を0°とし、背景刺激の縞に対して平行である場合は+45°、直交方向である場合は-45°として処理した。図7に被験者4名の時間周波数と見える移動方向の結果を示す。パターンと時間周波数と縞の傾きについて3要因分散分析を行ったところ、パターンの主効果については被験者4名とも有意差が認められなかったが、時間周波数の主効果は被験者4名全員に認められ（ $F(1,63)=314.574, p<.001$ （被験者KF）, $F(1,63)=458.049, p<.001$ （被験者NK）, $F(1,63)=230.391, p<.001$ （被験者MO）, $F(1,63)=757.172, p<.001$ （被験者MI））、点滅なし（0Hz）に比べ点滅あり（10Hz）の条件で見える移動方向が直交する方向に近いことが示された。



図6 刺激の例（左、傾き45°の縞刺激、右、傾き135°の灰色刺激）

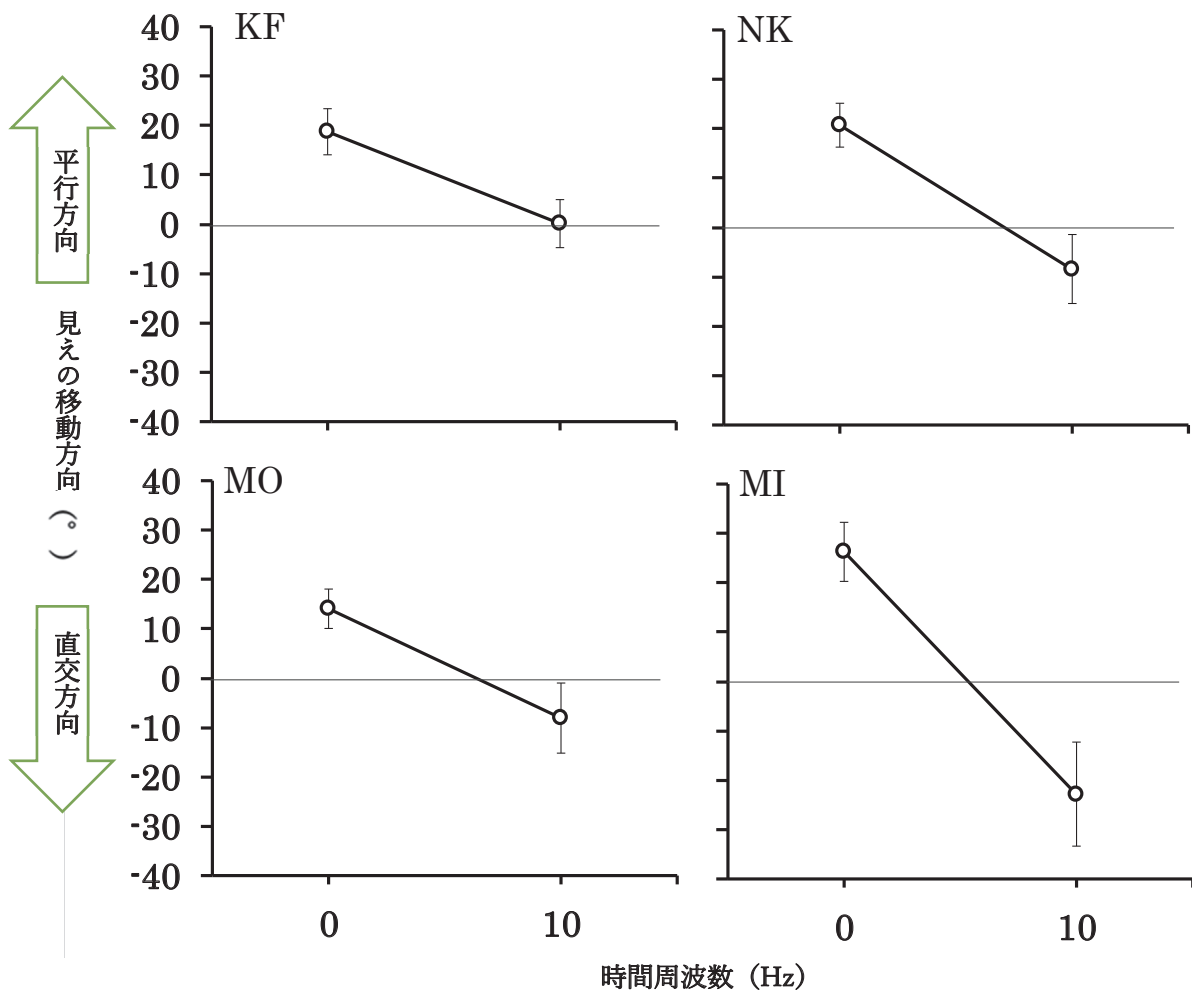


図7 各被験者における時間周波数における見えの移動方向 (エラーバーは標準偏差)。

図8に被験者4名のパターン条件別の時間周波数と見えの移動方向の結果を示す。図8よりいずれのパターン条件でも0Hzでは見えの移動方向が縞と平行な方向へ知覚され、10Hzでは直交方向への運動が知覚されることが示された。2名の被験者についてパターン条件と時間周波数縞の交互作用が認められたため ($F(1,63)=9.863, p<.01$ (被験者 KF), $F(1,63)=12.363, p<.01$ (被験者 MI)) 単純主効果検定を行った結果、KFの10Hzの条件、MIの0Hz・10Hzの条件では縞刺激と灰色刺激の見えの移動方向に有意差が認められ、縞刺激の見えの移動方向が灰色刺激に比べ0Hzではより平行方向10Hzではより直交方向であることが示された。パターンの主効果は認められなかったが、2名の被験者では時間周波数との交互作用が認められ、時間周波数の効果はパターンによって異なり、点滅による見えの移動方向の変化は灰色刺激より縞刺激の方が大きいことが示唆された。

傾きの主効果については3名の被験者で認められ ($F(1,63)=11.423, p<.01$ (被験者 KF), $F(1,63)=13.981, p<.001$ (被験者 NK), $F(1,63)=230.391, F(1,63)=18.973, p<.001$ (被験者 MI)), いずれも45°より135°の方が縞と平行方向に知覚されることが示された。実験2では刺激呈示位置は左に固定したため、この結果は点滅による逆向きの内部運動が生じ、フロー錯視量が増大したことを示す。

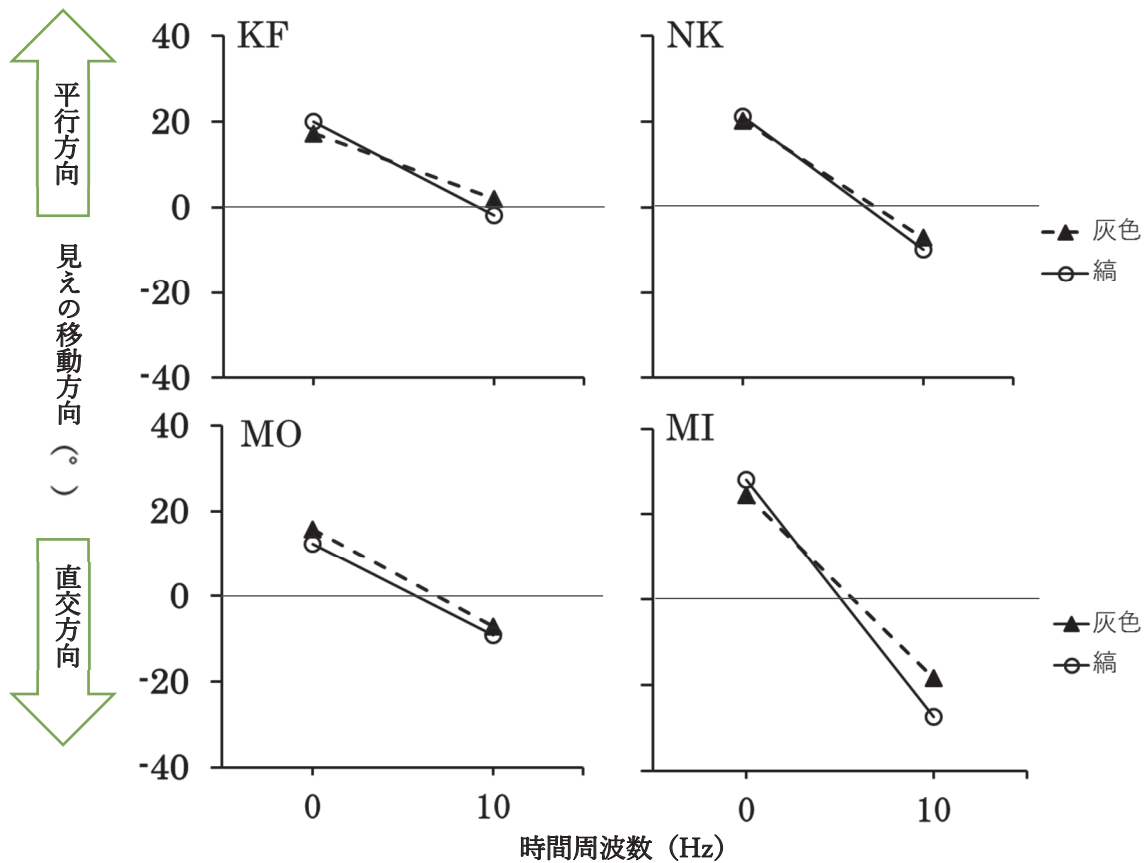


図 8 各被験者におけるパターンと時間周波数における見えの移動方向

4 総合考察

本研究における実験 1 から、フロー錯視が生じる運動刺激の時間周波数を変化させることにより、見えの移動方向が異なることが示された。見えの移動方向は時間周波数が 0Hz~2Hz ではフロー錯視方向である背景縞に平行方向であるが、時間周波数の増大に伴い見えの移動方向が平行方向から直交方向に変化し、10Hz~12Hz をピークとして直交方向（ -45° ）に最も近い方向に知覚され、さらに時間周波数が増えると再び直交方向から平行方向へと知覚された。0Hz の点滅なし条件では運動刺激が縞に沿って平行方向に知覚され、フロー錯視が生じることが確認された。また、点滅条件の時間周波数 7.5Hz のときに見えの移動方向は約 0° で物理的運動方向と等しく、Allard & Faubert (2016) と一致する結果であると考えられる。

実験 1, 実験 2 の結果から、時間周波数が 10Hz~12Hz のときに見えの移動方向が縞に対して最も直交方向に近い方向に知覚されることが示された。Shioiri & Cavanagh (1990) によると運動刺激の呈示中にブランクを挿入することにより実際に動いている方向と逆方向の運動が知覚される (reverse apparent motion) ため、本研究における点滅条件においても縞刺激の内部運動が点滅により逆方向 (縞の傾きに対して直交方向) に知覚されると考えると、物理的運動方向を 0° 、フロー錯視を生じる縞に平行な方向を $+45^\circ$ とする見えの移動方向においては、内部運動方向は reverse apparent motion により $+135^\circ$ から逆方向の -45° 方向に変化すると考えられ、この逆向きの内部運動方向の影響により背景縞の直交方向 (-45°) に知覚されたと解釈できる。実験 2 では内部運動のないパターンとして灰色刺激を用いたが、点滅により灰色刺激と交代して背景の縞が呈示されていたため、この縞が内部運動の代わりとなり、縞刺激と同様の内部運動を生じ直交方向に知覚されたと考えられる。灰色刺激の方が縞刺激より見えの移動方向の変化が少なく、 0° (物理的運動方向) に近い結果は、灰色刺激

ではブランク時のみ縞が呈示され、内部運動が減じたためだと考えられる。時間周波数については、コントラスト感度の時間周波数特性が帯域通過型を示し、10Hz 前後で最大感度であると考えられる (Kelly, 1961) ことから、10~12Hz の時間周波数条件で点滅に対する感度が上昇し、見えの移動方向が最も背景縞に対して直交方向に知覚されたと考えられる。

縞の傾きと呈示位置の交互作用から、刺激を左に呈示すると 135°、右に呈示すると 45° の条件でフロー錯視が増大することが示された。左に刺激を呈示したときに 135° の傾きの場合は運動刺激の内部運動は右上に向かい、右に呈示した時は 45° の場合は左上へ内部運動が生じ、どちらも固視点に向かう内部運動方向となっており、Shioiri & Cavanagh (1990) による reverse apparent motion が生じるとすれば固視点から外へ向かう内部運動方向になる。Anstis (2012) によれば、偏心度が増大するとフロー錯視量は増大するため、固視点から偏心度が増大する方向である外へ向かう内部運動方向で、縞に平行方向に知覚され、フロー錯視量が増大したと考えられる。実験 1 で、時間周波数と縞の傾きと呈示位置の三次の交互作用が認められ、点滅がある場合に縞の傾きと呈示位置に交互作用がみられた。これらの結果から、周辺視で縞に沿った方向に知覚されるフロー錯視は運動刺激の内部運動と物理的運動方向によって生じていると考えられるが、点滅により内部運動方向が逆転することにより (Shioiri & Cavanagh, 1990)、見えの移動方向が縞に直交する方向に変化することが示唆される。

引用文献

- Allard, R., & Faubert, J., (2016). The Role of Feature Tracking in the Furrow Illusion. *Frontiers in Human Neurosci.* 10, 3389-3397.
- Anstis, S. (2012). The furrow illusion: peripheral motion becomes aligned with stationary contours. *Journal of Vision.* 12, 1-11.
- Anstis, S., & Cavanagh, P. (2018). Crowding and the furrow illusion. *i-Perception*, 9, 1-4.
- Kelly, D. H. (1961). Visual responses to time-dependent stimuli. I. Amplitude sensitivity measurements. *Journal of the Optical Society of America*, 51, 422-429.
- Lu, Z.-L., & Sperling, G. (1995). The functional architecture of human visual motion perception. *Vision Research.* 35, 2697-2722.
- Shioiri, S., & Cavanagh. (1990). ISI produces reverse apparent motion. *Vision Research*, 30, 757-768.
- Wilson, S., Geisler (1999). Motion direction signals in the primary visual cortex of cat and monkey. *Nature*, 400, 65-69.

(2022年 2月 7日 受付)
(2022年 3月 16日 受理)