

運動対象観察時の空間定位に関する実験的検討

– 眼球運動との関係を中心として –

本居快¹⁾・高橋啓介²⁾

Experimental studies on the spatial orientation during an observation of moving object.

Kai MOTOORI and Keiusuke TAKAHASHI

Abstract

Shim & Cavanagh (2006) reported that when a stimulus was flashed during the observation of an apparent motion in the absence of eye movement, its perceived position was mislocalized toward a moving stimulus. They hypothesized that the interaction of the signals of eye movement and attention contributed to the mislocalization. However, to verify their hypothesis, it will be necessary to examine the mislocalization during the observation of the actual motion in the absence of eye movement and on the occurrence of the saccade and pursuit eye movements respectively. In experiment 1, we examined the mislocalization of the stimulus when the saccade and pursuit occurred. In experiment 2, we examined the mislocalization of the stimulus during the observation of the actual motion and apparent motion in the absence of eye movement, respectively. The results were as follows; 1) The mislocalization of stimulus was observed in all experimental conditions. 2) The consequent degrees of mislocalization in the condition of occurrence of pursuit were more than those in the condition of occurrence of saccade. 3) The consequent degrees of mislocalization during an observation of the actual motion in the absence of eye movement were more than those during an observation of the apparent motion in the absence of eye movement. These results suggest that the hypothesis of Shim & Cavanagh(2006) needs to be strengthened.

Keywords: eye movement, apparent motion, actual motion, mislocalization, attention

眼球運動、仮現運動、実際運動、位置の錯誤、注意

I 問題

観察されるヒトの眼球運動には様々なものがあるが、その中でも saccade と pursuit は代表的な随意的眼球運動である。眼球運動中の網膜入力情報の処理機序は、視空間の安定性の保持と密接に関連する機序である。そのため、これらの眼球運動と視対象の空間定位との関係について検討することは、視空間の安定性の機序を理解する上で極めて重要である。まず pursuit 眼球運動の眼球位置情報については、Dodge(1904)によると、暗黒視野中で運動刺激を追視すると、その刺激の運動軌道が実際とは異なった軌道で知覚されることが報告されており、また、Festinger & Easton(1974)は運動刺激に対して正確な

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

pursuit が行われていたとしても、その運動軌跡が歪んで知覚され、刺激の動きを知覚するための位置情報が不完全であるということを示した。また、距離知覚について運動刺激の移動距離が過小視されることが報告されている。Honda(1990)によると、運動刺激を pursuit すると、刺激の移動距離はその速度に関わらず saccade の 10~20%短く知覚され、Festinger, Sedgwick, & Holtzman (1976)によると、往復運動する刺激を pursuit すると刺激の移動距離はさらに短く知覚されることが報告されている。これらの報告は pursuit の情報処理システムが、眼球運動の大きさや眼球運動の速度に関して正確な情報をもたらさないことを示唆している。

では、saccade 中の網膜情報はどのように処理されているのだろうか。我々は saccade 中の流動する網膜像を知覚することも、視野の動揺を知覚することもなく、鮮明な視野を獲得することができる。この機能は、視空間の安定によって保たれている。網膜像の移動は通常の運動知覚をもたらすが、眼球運動によって引き起こされた場合には見かけの運動が生じず、日常場面では saccade 時に視対象や視環境は動かないというように、網膜像変化に伴う運動情報を視覚的に打ち消す働きが考えられる。この機能は、saccade 中に呈示される刺激に対して知覚感度を低下させる特性である saccade 抑制によって実現されているという立場と、saccade の開始時または開始直前に短時間呈示される視覚刺激の見かけの位置が物理的位置からずれて見える、saccade による位置変化という視覚情報入力系の不完全さが、結果的に視空間の安定性を実現しているのではないかとの立場(Honda, 1995)との間で古くから議論が続いており、現在は saccade による位置変化は saccade 抑制と処理過程を部分的に共有している可能性が示唆されている。

Honda(1985; 1990)によると、暗黒視野で周辺視野に呈示された視覚刺激を saccade で捕捉した場合、初めの注視位置から刺激までの距離がほぼ正しく定位され、また、その刺激の自己中心的位置もほぼ正しく定位される。このことは、saccade システムが、実行された saccade の大きさに関して正確な網膜外情報をもたらすことを示唆している。一方、saccade 中に視覚刺激が瞬間呈示されると、その位置は誤って知覚される。もし、視覚系がいかなる時も眼球位置情報と網膜像を正確に得ているのであれば、saccade を行ったとしても刺激の位置は正しく判断されるはずである。しかし、saccade による見かけ上の位置変化が刺激条件に依存して生じることから、視覚系は正確な眼球位置または網膜像を得ていないことが推測される。このような考察に基づき Honda(1990)、本田(1991)は、saccade による網膜像信号に較べて網膜外信号の変化が緩慢であり、その違いが刺激の見かけ上の位置の変化をもたらすとしている。

また、刺激の見かけ上の位置の変化は、saccade 抑制に基づく機序でも説明できる。saccade 直前直後の連続的な視覚刺激に対する抑制効果によって、saccade の軌道に空間的に近接した場所に瞬間的に呈示される視覚刺激に対する感度が低下する。この現象には、saccade 抑制の生起機構であるコロラリ放電と呼ばれる網膜外信号と、呈示されている刺激自体との両方が重要であると考えられている。その機序については十分に解明されていないが、コロラリ放電によって saccade の指令信号のコピーが視覚情報処理過程のいずれかの段階に転送されると、その結果として視覚刺激に対する感度の低下が生じると考えられている(光藤, 2011)。

他方、saccade 時の呈示刺激の定位の変位は saccade 圧縮によるものであるとする考えもある。Ross, Morrone, & Burr(1997)は、saccade の目標点に向かって視空間全体が圧縮されるように、物体の位置が誤って知覚されるという現象を報告している。Ross et al. (1997)は saccade 刺激の軌道延長上に呈示された刺激に対しては、saccade 直前約 50ms の時間を最大に、saccade 刺激側(saccade 方向とは逆の方向)に定位されることを報告している。そして、saccade 刺激より固視点に近い側に配置された刺激に対しても、saccade 刺激側(saccade 方向と同方向)に定位される。Lappe, Awater, & Krekelberg(2000)は、この現象には saccade 後に視覚的に参照枠となる刺激が存在することが特に重要であると論じている。saccade の

終了した直後に視覚的参照枠となる刺激がスクリーン上に呈示されている時に、saccade 圧縮が強く現れる。一方、視覚的参照枠が見えない暗室状態での実験では圧縮は生起しない。

また、神経科学的にもいくつか注目すべき神経細胞活動が報告されている。saccade開始の直前直後に瞬間呈示された刺激の定位の誤りは、中枢神経系において網膜情報と眼球運動情報が時間的に正しく同期していないことが原因であろうと以前から考えられてきた。特に、サルのLIP野や上丘で発見されているような、saccade直前に視覚刺激に対する受容野が一時的に変形する神経細胞が関与しているであろうとされている(Ross, Goldberg, & Burr,2001)。また、Matsumiya & Uchikawa(2003)は、saccade中に生じた刺激の位置変化とsaccade圧縮の関係について検討し、saccade圧縮がsaccade前の視覚情報をsaccade後の視野に再配(remapping)する役割を果たしているという仮説を提唱している。

しかしながら、saccade による視覚刺激の定位の誤りは saccade の実行そのものではなく、それに随伴する要因によって起こるものではないかという問題意識も従来から存在している。MacKay(1970)は、背景が見える状況では網膜像の急速な移動が起こるが、saccade による急速な網膜像の流動をスクリーン上でシミュレートする前後に視覚刺激を瞬間呈示すると、刺激の定位誤りが生じることを報告している。他方、Honda(1995)は網膜像の急速な移動による定位誤りと saccade によって起こる定位誤りとを比較し、両者が異なることを示している。このことから十河・苧坂(2005)は、saccade による空間圧縮の原因は網膜像の急速な移動ではなく、注意の移動による効果と saccade 実行による効果とが排他的でもなく加算的でもなく、複雑な相互作用を持つことが原因ではないかとの仮説を提出している。

眼球運動に伴う空間圧縮の問題に関係して、眼球運動に関与する注意の機能については様々な知見が示されており、注意は眼球運動信号伝達細胞を活性化させるために単なる標的選択する機能を有するのか、それとも、注意は眼球運動信号伝達システムから独立しているのかが議論されてきた。この問題について Shim & Cavanagh(2006)は、眼球運動を抑制した状態(固視点を凝視させた状態)で仮現運動刺激を観察している時に瞬間的に呈示される刺激が、仮現運動刺激の方向に空間的に変位して知覚され、視野上の顕著な対象に向かって注意が空間的に引き込まれる効果と、実際の眼球運動が生起する前の準備的な網膜外信号である眼球運動準備信号とが相互に関係することによって、saccade 圧縮のような効果が認められたのではないかという仮説を提出している。しかしながら、彼らの仮説を検証するためには、まず、眼球運動準備信号が、実際に眼球運動を生じた場合と同じように機能するのか否かを確定する必要があるだろう。そのためには、眼球運動生起時と眼球運動の抑制下で運動刺激を観察している場合とで、視覚刺激の空間定位がどのように異なるのかを検討する必要がある。さらに、眼球運動準備信号が saccade に特化したものであるのか、すなわち、saccade と同様に運動刺激を追視する機能を有する pursuit の準備信号は空間定位に影響を及ぼさないのかについても検討する必要があるだろう。そこで本研究では、まず、saccade と pursuit の 2 種類の眼球運動生起時の空間定位の変位について測定し、さらに、それらの眼球運動誘発刺激の眼球運動抑制下で観察した場合の空間定位の変位について検討することとした。

II 実験 1

1. 目的

仮現運動刺激を眼球運動を伴わない状況下で観察した場合にも、saccade による位置の変位と同様の現象が生じ、その機序として saccade の準備信号が関与しているとする Shim & Cavanagh(2006)の仮説は、同じ実験パラダイムで眼球運動生起時の圧縮効果を確認していない点から必ずしも支持できない。この問題を明確にするためには、眼球運動生起時の空間定位について検討する必要がある、さらに saccade 実行による空間定位への関与を確定するためには、pursuit 時に同様の現象が生じないことを確認する必要がある

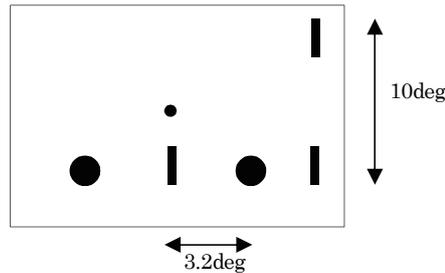


図2 刺激のレイアウト

実験条件：眼球運動条件：仮現運動刺激(運動刺激 30ms 呈示、ISI=260ms。運動 1 周期 580ms)による saccade 条件と実際運動(運動 1 周期は 520ms)による pursuit 条件の 2 条件を設定した。

呈示視野条件：運動刺激および test bar の呈示視野を固視点から上方 5° の位置の水平線上に呈示し、下方も同様に設定し、2 水準とした。これに伴い、reference bar の呈示位置は運動刺激および test bar と上下方向で反対側に呈示された。左右の空間順位についてはカウンターバランスを取った。

test bar の SOA 条件：運動刺激の 3 周期目開始からの SOA(Stimulus Onset Asynchrony) について 30ms、130ms、260ms、290ms の 4 条件を設立した。

上記の各実験条件を総当たりで組み合わせた 16 条件を実験条件とした。

また、眼球運動が正確に行われているかどうか検討するために、二重課題として運動刺激の始発点または終発点のいずれかに、1 試行に 1 度、運動刺激の色を変化させ、その色の変化について回答させた。正答時のデータを正しく眼球運動が行われた場合のデータとして分析対象とした。

測度：test bar の判断された位置の物理的呈示位置(reference bar の水平方向の呈示位置)からの変位量(分)。test bar が呈示された時点で、test bar がその物理的呈示位置から運動刺激が呈示されている位置に接近する方向に変位して知覚された場合は変位量を「+」として、test bar がその物理的呈示位置から運動刺激が呈示されている位置より遠ざかる方向に変位して知覚された場合には変位量を「-」として処理した。

手続き

観察距離 57.3cm で被験者の顔面を固定した状態で刺激の観察を行わせた。被験者には運動刺激が呈示されるまでは固視点を固視させ、固視点呈示 1500ms 後に半径視角 0.6°の運動刺激をディスプレイ画面上に呈示しそれと同時に運動刺激を追視させた。運動刺激を固視点の上方、あるいは下方視角 5° の軌道上で、偏心度左方視角 3.2°から右方視角 3.2°の距離で仮現運動あるいは実際運動するように呈示した。仮現運動は 1 周期 580ms、実際運動は 1 周期 520ms とし 3 周期呈示した。また、reference bar を運動刺激の折り返し点から視角 3.9° 運動軌道上外側で、運動刺激に対して上下方向反対側視角 10° の位置に呈示した。運動刺激が 3 周期目の運動に入った時点を中心として各 SOA 条件に従って、固視点から上方、あるいは下方視角 5° の運動刺激の軌道の外側、運動刺激の折り返し点から運動軌道上外側視角 3.9° の位置に test bar を、固視点の真上、あるいは真下視角 5°の運動軌道上に foil bar を同時に呈示した。foil bar は、test bar の呈示による不随意の眼球運動を抑制するために呈示された。呈示された仮現運動刺激と、実際運動刺激とを追視させ、仮現運動刺激では、刺激を追視させることにより saccade を、実際運動刺激では、刺激を追視させることで pursuit を惹起した。被験者の課題は、二重

課題として示された運動刺激の色の変化を「始発点、後発点、変化なし」の3つの内から回答することであり、同時に test bar の見かけの位置をマウスを用いて示すことであった。この一連の課題を、ランダムにされた全ての実験条件において実施し、それらを6回繰り返した。試行間には1分の休憩を挿入した。

3. 結果

まず眼球運動を正しく行っているか確認するために、表1に saccade 条件時、表2に pursuit 条件時の呈示視野別二重課題の正答率を示した。二重課題についての正答率が saccade 条件では上視野の正答率が下視野の正答率より低いことが示され、pursuit 条件では上下視野ともに100%であった。本実験では、二重課題が正答であった場合のデータのみを分析の対象とした。

Shim & Cavanagh(2006)の、眼球運動が実際に生じていなくても saccade に伴う位置移動のような効果がみられるという所見の妥当性について検討するために、実際に眼球運動を生じさせ、眼球運動条件間に test bar の定位の変位がみられるか、その変位量に及ぼす眼球運動、刺激の呈示視野、刺激呈示 SOA の各要因の効果について検討した。図3に各眼球運動条件の各呈示視野条件における test bar の平均変位量(分)を、図4に各眼球運動条件における test bar の平均変位量の SOA に伴う変化を示した。また、test bar の変位量に及ぼす刺激の呈示視野、眼球運動、運動刺激呈示 SOA の各要因の効果について3元配置分散分析を行った。その結果、眼球運動条件と呈示視野条件の交互作用($F(1,23)=5.789, p<.05$)が認められた。また、眼球運動条件と SOA 条件の交互作用に傾向が認められた($F(3,69)=6.253, p=.051$)。そこで両要因について単純主効果検定を行った。その結果、眼球運動条件と呈示視野間では saccade 条件での各呈示視野条件間に単純主効果が認められ($F(1,23)=9.095, p<.01$)、上視野に較べ下視野で有意に変位量が大きかった。また、上視野条件($F(1,23)=27.345, p<.001$)および下視野($F(1,23)=6.744, p<.01$)いずれにおいても眼球運動条件間の単純主効果が認められ、いずれの視野条件でも saccade 条件に較べ pursuit 条件で有意に変位量が大きかった。また、各 SOA 条件における運動条件間に単純主効果が認められ($F(3,25)=9.22, p<.01$)、いずれの SOA 条件においても、saccade 条件に較べ pursuit 条件で変位量が大きかった。また pursuit 条件における SOA 条件間に単純主効果が認められたため、多重比較を行ったところ、SOA30ms 条件に較べ、SOA260ms 条件($p<.001$)および SOA290ms 条件($p<.05$)において有意に変位量が大きかった。

表1 saccade 条件での二重課題正答率

	上視野	下視野
正答率	77%	88.2%

表2 pursuit 条件での二重課題正答率

	上視野	下視野
正答率	100%	100%

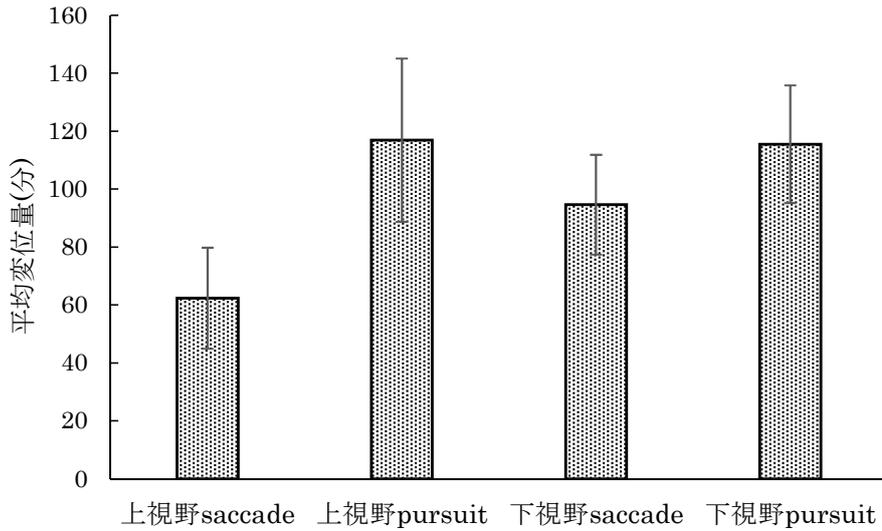


図3 各眼球運動条件の各呈示視野条件における test bar の平均変位量 (エラーバーは片側 0.5sd を示す。)

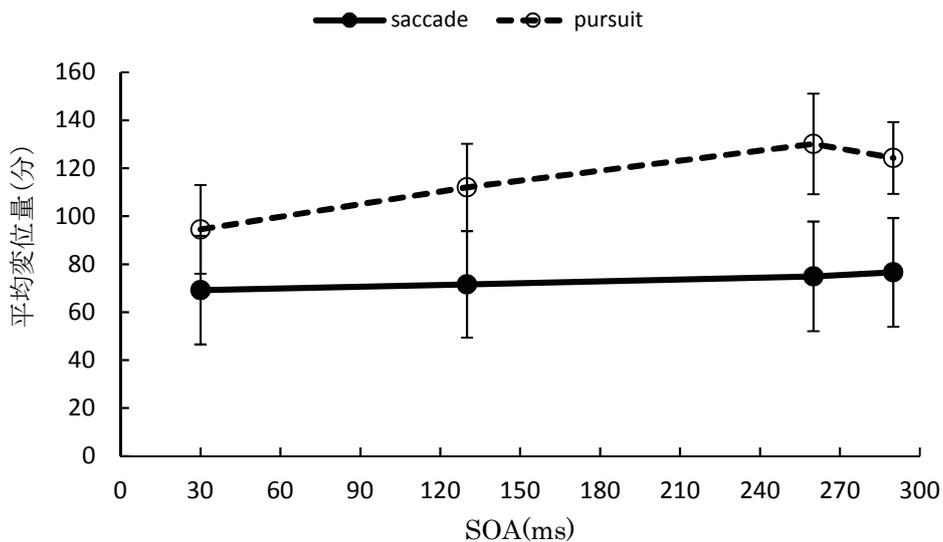


図4 各眼球運動条件における test bar の平均変位量の SOA に伴う変化 (エラーバーは片側 0.5sd を示す。)

4. 考察

本実験では、Shim & Cavanagh(2006)が報告している、眼球運動が生じていなくても saccade に伴う空間圧縮のような効果がみられるという所見の妥当性について検討するために、仮現運動刺激によって saccade を生起させた場合と実際運動を追視させることで pursuit を生起させた場合とについて、瞬間的に呈示される test bar の位置の知覚を検討した。その結果、眼球運動の生起時にも、test bar の運動刺激方向への引き寄せが測定され、pursuit 条件の方が saccade 条件よりも変位量が有意に大きいことが見出された。saccade 条件における test bar の位置の変位は、視覚系が能動的に視空間の安定性を保持しているのではなく、視覚系が高速な画像運動を test bar の処理できない、あるいは抑制することによって実現している視空間の安定(Burr, Holt, Johnstone, & Ross, 1982 ; Burr, Morgan, & Morrone, 1999; Curie, McConkie,

Carlson-Radvansky, & Irwin, 2000; Deubel et al., 1998)に付随した、saccadeによる見かけ上の位置の変化という現象によって説明できる。つまり、saccadeによる網膜像信号に較べて網膜外信号の変化は緩慢であるため、その違いがtest barの見かけ上の位置の変化をもたらしたのではないかと考えられる。

一般的に、saccade中の網膜像移動に対する視覚系の感度は高くなく、安定させるべき視覚情報はほとんど存在しない。このことから、saccade時の視空間の安定は、網膜像が高速に移動していることを原因とする処理の抑制によって生じると考えられる。また従来よりsaccade圧縮の研究は、多くの場合統制された背景を用いて検討されており、そのような状況下では顕著な視覚刺激に向かって空間的注意が引き込まれることにより、test barの位置がsaccadeを惹起する運動刺激の方向に圧縮したように知覚されるのかもしれない。神経生理学的にもsaccade開始直前直後に瞬間呈示された刺激の定位の誤りは、中枢神経系において網膜情報と眼球運動情報が時間的に正しく同期していないことが原因であろうと考えられており、特にサルの上野や上丘で発見されているような、saccade直前に視覚刺激に対する受容野が一時的に変形する神経細胞が関与しているであろうとされている(Ross, Morrone, Goldberg, & Burr, 2001)。

他方、pursuit時に生起する位置知覚についてもいくつか報告されており、Hubbard(2005)はpursuit生起時には運動刺激の定位がpursuitの方向の延長線上にずれて知覚されることを報告している。また、本実験におけるpursuit条件では対象の移動距離が過小視される傾向が認められた。本田(1991)は、それは網膜外情報が眼球位置や眼球運動量に関してあまり正確な情報をもたらさないためと説明している。またpursuit条件では、test bar呈示SOAの効果が認められ、運動刺激がtest barに対して遠くに位置するタイミングで呈示された場合の知覚量より、近くに位置するタイミングで呈示された場合のtest barの引き寄せ量が大きいことが示された。このことは、pursuit条件におけるtest barの位置の変位が、単にpursuitによる空間圧縮効果によるだけではなく、他の要因の影響の可能性を強く示唆するものであり、pursuitによる空間圧縮が空間内で均一ではなく、追視対象の近傍空間の方がその周辺空間よりも圧縮率が高い可能性を示唆している。

また、本実験ではtest barが運動刺激側に引き寄せられる程度が、pursuit条件においてsaccade条件よりも50%程度増加している。これは、運動刺激に対してpursuitすると、刺激の移動距離が対象の速度に関わらず、saccadeした場合より約10~20%短く知覚されるというMack & Herman(1972)、Honda(1990)の知見とは量的な差はあるものの、質的には一致している。量的な差については、Festinger, Sedgwick & Holtzman(1976)が、pursuit刺激を往復運動させると、その空間圧縮効果は強くなることを報告しており、本実験では被験者に3往復する運動刺激をpursuitさせたことが、Mack & Helman(1972)、Honda(1990)よりもpursuitによる空間圧縮効果を増大させ、test barの引き寄せ量が増加したのだと解釈できる。

また、運動条件と呈示視野条件間に交互作用が認められた。図3および統計検定結果によれば、saccade条件では、test barを下視野に呈示した場合に較べ上視野に呈示した場合の変位量が有意に小さかった。他方、pursuit条件では上下の呈示視野間に差異は認められなかった。このことは、saccade条件では下視野に較べ上視野での仮現運動刺激の追視が難しかった可能性を示している。表1、表2によれば、眼球運動の生起を確認するための二重課題の正答率も、上視野のsaccade条件で正答率が低く、他方、pursuit条件では二重課題の正答率は呈示視野に関わらず100%で、知覚位置の変位量にも上下視野間で差異が認められなかった。したがって、saccade条件でも眼球運動の制御を正確に行うことができれば、test barの変位量に上下視野間で差異は検出されない可能性は十分に考えられる。

本実験では、その種類に関わらず眼球運動時の空間圧縮効果により、test barの知覚的位置がその物理的位置より、運動刺激側に引き寄せられ、saccade時よりpursuit時の方がその引き寄せ量が増加すると

いう、Honda(1990)の知見に沿った所見を得た。しかし、眼球運動に伴う空間圧縮の問題については、十河・苧坂(2005)が、網膜像の急速な移動が圧縮の原因ではなく、注意の移動による効果と saccade 実行による効果とが排他的でもなく加算的でもなく、複雑な相互作用を持つという可能性を示唆しており、運動刺激を眼球運動を生起させずに観察し、注意の移動が生じただけでも圧縮効果が生起するののかという点について検討する必要がある。

Shim & Cavanagh(2006)は saccade 圧縮について、眼球運動を抑制した状態で saccade 誘発刺激の観察させた場合の所見のみに基づいて、眼球運動準備信号の寄与の可能性を論じているが、実験 1 では眼球運動下では saccade のみならず pursuit でも同様の圧縮が生じることが確認された。そこで実験 2 では、saccade と pursuit の両眼球運動による空間圧縮が、眼球運動を抑制した状態で、test bar がどの程度変位するのかを検討することによって、空間定位の歪みに対する注意の移動による効果と眼球運動準備信号の効果について検討する。

III 実験 2

1. 目的

saccade 性の眼球運動が生じるときに網膜入力情報の抑制が生じることが、saccade 抑制と言われ、古くから知られている(Riggs, Merton, & Morton, 1974)。また、Ross, Morrone, & Burr(1997)によって saccade に伴って空間が圧縮される現象は saccade 圧縮と報告されており、それが純粋に saccade の実行によって惹起されているのか、という問題が研究課題になっている。saccade 圧縮については、十河・苧坂(2005)が、注意の移動による効果と saccade 実行による効果とが排他的でもなく加算的でもなく、複雑な相互作用を持つ可能性を示唆しており、Shim & Cavanagh(2006)は、眼球運動が抑制状態でも saccade 圧縮と同様の効果を生起し、仮現運動刺激の軌道上外側に瞬間的に呈示された刺激が、物理的呈示位置ではなく、仮現運動刺激が呈示されている方向に引き寄せられるという、見かけ上の位置の変位が見られることを報告している。そして、運動刺激として saccade を惹起し得る刺激が呈示されることによる注意の移動と、saccade を惹起する遠心性の信号の機序が相互に関係している可能性について検討している。実験 1 では、眼球運動を惹起した場合の test bar の定位について検討し、saccade より pursuit の方が空間定位の変位量が大きくなるとの所見を得て、Shim & Cavanagh(2006)の用いた実験パラダイムでも、眼球運動が空間圧縮作用に関与しているという、先行知見(Ross et al., 1997; Lappe et al., 2000)と合致した結果が確認できた。しかし Shim & Cavanagh(2006)の報告した視覚刺激の空間定位の変位が、眼球運動を抑制した状況において、saccade を惹起するような仮現運動刺激によってのみ誘発されるのか、pursuit を誘発するような実際運動刺激を観察した場合でも生じるのか、即ち、この現象に saccade を制御する機序の特異的な関与が想定されるのかについては検討されるべき課題として残されている。そこで本実験では、仮現運動刺激と実際運動刺激とを眼球運動を抑制した状況下で観察させた際の、test bar の空間定位の変位の有無、およびその量について検討した。

2. 方法

被験者：実験 1 と同一の被験者とした。

刺激・装置：実験 1 と同一の刺激間距離、装置を用いた(図 1、図 2 参照)。

実験条件：観察運動条件：仮現運動条件(運動刺激の呈示時間は 30ms、ISI は 260ms。運動 1 周期は 580ms。)と実際運動条件(運動 1 周期は 520ms。)の 2 条件を設定した。

呈示視野条件：運動刺激および test bar の呈示視野を固視点から上方視角 5° の位置の水平

線上に呈示し、下方も同様に設定し、2水準とした。これに伴い、reference barの呈示位置は運動刺激およびtest barと上下方向で反対側視角10°の位置に呈示された。左右の空間順位についてはカウンターバランスを取った。

test barのSOA条件:運動刺激の3周期目開始からのSOAを30ms、130ms、260ms、290msの4条件を設定した。

上記の各実験条件と総当たりで組み合わせた16条件を実験条件とした。

測度: test barの判断された位置の物理的呈示位置(reference barの水平方向の呈示位置)からの変位の量(分)。test barが呈示された時点で、test barがその物理的呈示位置から運動刺激が呈示されている位置に接近する方向に変位して知覚された場合は変位量を「+」として、test barがその物理的位置から運動刺激が呈示されている位置より遠ざかる方向に変位して知覚された場合には変位量を「-」として処理した。

手続き

実験1と同様に、観察距離57.3cmで被験者の顔面を固定した状態で刺激の観察を行わせた。ディスプレイ中心に半径視角4.7°の固視点を呈示し、被験者には実験試行の間中、この固視点を凝視し続けるよう求めた。刺激の運動、呈示位置は実験1と同様とした。被験者の課題は、運動刺激が3周期目に入った時点を中心として、各SOA条件に従って呈示されるtest barの見かけの位置をマウスを用いて示すことであった。この一連の課題を、ランダム化された全ての実験条件において6試行繰り返した。試行間には1分の休憩を挿入した。

3. 結果

Shim & Cavanagh(2006)との比較のために、観察運動条件間にtest barの変位量が見られるか、またtest barの変位量に及ぼす観察運動条件、刺激の呈示視野、刺激呈示SOAの各要因の効果について検討した。図5に各観察運動条件におけるtest barの平均変位量のSOAに伴う変化を示した。また、test barの変位量に及ぼす観察運動条件、刺激の呈示視野、刺激の呈示SOAの各要因について3元配置分散分析を行った。

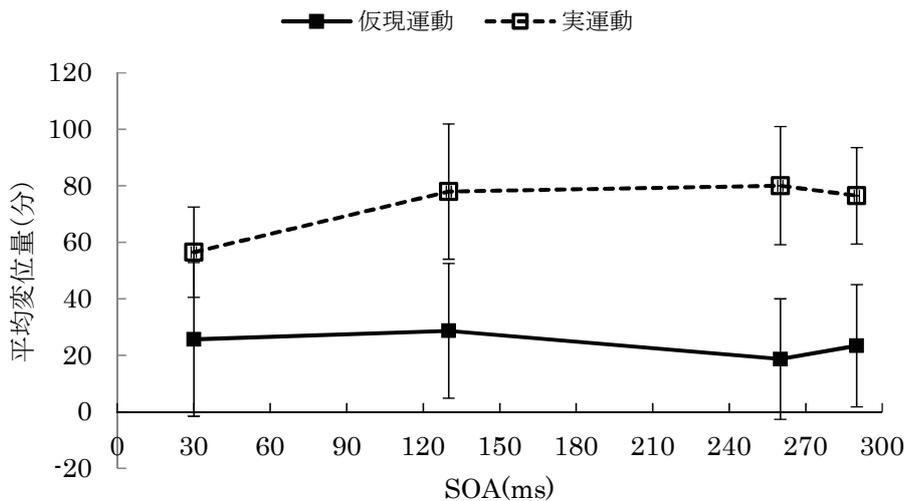


図5 各観察運動条件におけるtest barの平均変位量のSOAに伴う変化 (エラーバーは片側0.5sdを示す。)

その結果、観察運動条件と SOA 条件の交互作用($F(3,69)=5.158, p<.01$)が有意であったため、観察運動条件と SOA 条件の単純主効果検定を行ったところ、各 SOA 条件において観察運動条件の単純主効果が認められ($F(1,23)=21.539, p<.001$)、いずれの SOA 条件においても実際運動条件に比べ仮現運動条件での test bar の変位量が有意に大きかった。また、各観察運動条件における SOA の単純主効果については、仮現運動条件では SOA の単純主効果は認められず、実際運動条件で SOA の単純主効果が認められた($F(3,21)=11.067, p<.001$)。そこで、実際運動条件での SOA 条件間での多重比較を行ったところ、SOA30ms 条件に比べ、SOA130ms 条件($p<.001$)、SOA260ms 条件($p<.001$)、SOA290ms 条件($p<.001$)において有意に test bar の変位量が大きかった。つまり、実際運動条件において仮現運動条件より test bar の運動刺激方向への引き寄せ量が有意に大きく、実際運動条件では、運動刺激が test bar 呈示位置よりも遠い SOA30ms 条件では test bar の引き寄せ量が少なく、中間地点である 130ms から運動刺激が test bar の呈示位置に近接する後半の SOA 条件で引き寄せ量が有意に増加し、test bar の定位へのより強い影響が認められた。

ここで注意と眼球運動との各要因が test bar の変位にどのように関与しているのかを検討するために、実験 1 と実験 2 とを総合的に再分析することとした。その際、眼球運動刺激条件と観察運動条件とを統合して観察条件としてまとめて分析することとした。図 6 に各観察条件における test bar の平均変位量(分)の test bar 呈示 SOA に伴う変化を示した。

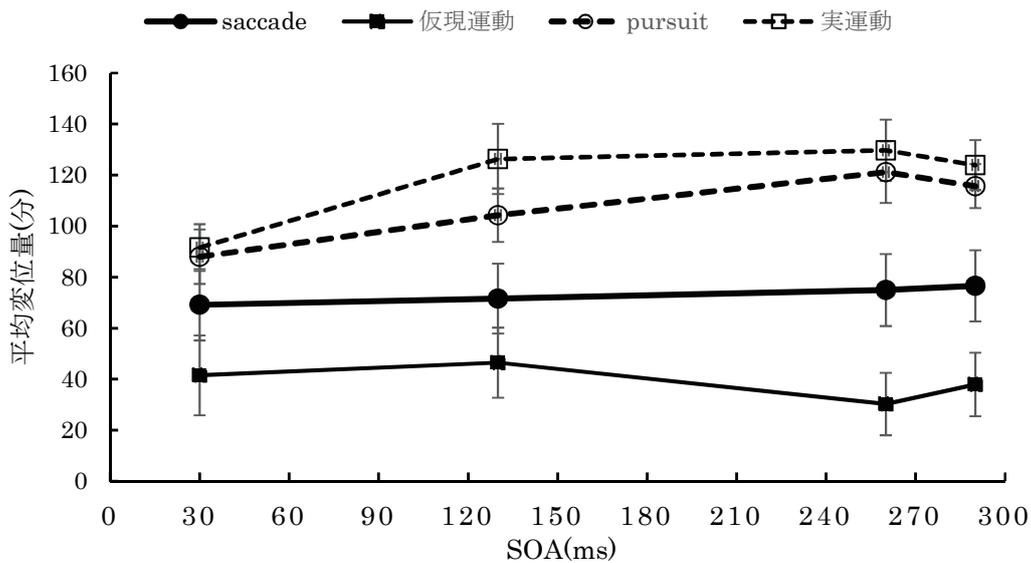


図 6 各観察条件における test bar の平均変位量の SOA に伴う変化
(エラーバーは片側 0.5sd を示す。)

test bar の変位量に対する刺激呈示視野、観察条件(仮現運動、実際運動、saccade、pursuit の 4 水準)、test bar 呈示 SOA の 3 要因の効果について 3 元配置分散分析を行った。その結果、観察条件と test bar 呈示 SOA 条件間に交互作用($F(9,207)=3.660, p<.001$)が認められたため、単純主効果の検定と多重比較とを行った。その結果、各観察条件における test bar 呈示 SOA の単純主効果($F(3,21)=13.890, p<.001$)および各 SOA 条件における観察条件の単純主効果($F(3,21)=11.067, p<.001$)が有意であった。各観察条件での test bar 呈示 SOA の単純主効果は各実験の「結果」で述べた通りであるのでここでは省略する。各 SOA

条件における各観察条件間の多重比較の結果、SOA30ms 条件では、仮現運動条件に比べ pursuit 条件 ($p<.001$)および実際運動($p<.001$)において有意に test bar の変位量が大きかった。SOA130ms 条件では、saccade 条件と仮現運動条件との間以外の全ての観察条件の組み合わせの間で、1%水準での有意差が認められ、saccade 条件に比べ pursuit 条件、実運動条件において有意に test bar の変位量が大きく、仮現運動条件に比べ pursuit 条件、実際運動条件において有意に変位量が大きく、また、pursuit 条件に比べ実運動条件で有意に test bar の変位量が大きかった。SOA260ms 条件と SOA290ms 条件のいずれにおいても、pursuit 条件と実際運動条件との間を除く全ての観察条件の組み合わせの間で、0.1%水準での有意差が認められ、pursuit 条件、実運動条件ともに saccade 条件および仮現運動条件より有意に test bar の変位量が大きかった。

上記の多重比較の結果、眼球運動条件である saccade 条件と眼球運動抑制条件である仮現運動条件との間には SOA 前半の 30ms、130ms 条件では有意差が認められなかったが、SOA 後半の 260ms、290ms 条件では saccade 条件で変位量が有意に大きいことが認められた。また、SOA130ms 条件において pursuit 条件より実際運動条件で変位量が有意に大きいことが示された。

4. 考察

本実験では、Shim & Cavanagh(2006)の報告した視覚刺激の空間定位の錯誤が、眼球運動を抑制した状況において、saccade を誘発するような仮現運動刺激のみによって誘発されるのか、また、実際運動を観察した場合でも生じるのかについて、仮現運動条件と実際運動条件とを眼球運動を抑制した状況下で観察させた際の test bar の空間定位の変位の有無、およびその量について検討した。その結果、観察する運動刺激が仮現運動であるか実際運動であるかに関わらず、眼球運動を抑制し、注意の移動のみで運動対象を観察した場合にも test bar の定位の変位が生じることが確認された。また、仮現運動を観察する場合に比べ実際運動を観察する場合の方がその変位量が有意に大きいとの所見を得た。仮現運動と実際運動の知覚は脳内事象としては等しく、運動の処理としては同等と仮定できるものの、空間定位に対する影響は異なる可能性を本所見は示唆している。運動処理過程の差異を想定できないにも関わらず空間定位の様相が異なることについては、Shim & Cavanagh(2006)の示唆する通り、仮現運動刺激に向けられる注意と空間定位の関係について考察する必要があるだろう。Shim & Cavanagh(2006)は、視覚的分節が乏しく、均質性が相対的に高い視野中に呈示された明瞭な視覚刺激に向かって空間的注意が引き込まれることにより、運動刺激方向に注意が誘導され、test bar の定位が変位すると考察している。しかし、本実験では実際運動観察時にも同様の現象の生起が認められ、しかも仮現運動観察時よりもその変位量が大きいことから、Shim & Cavanagh(2006)の仮説では、この現象の機序の説明として不十分であると考えられる。この点については、実験 1 との比較に基づいて、「総合考察」で改めて考察する。

また、仮現運動条件ではSOAの効果が認められなかった。Shim & Cavanagh(2006)では、SOAが130msの時にtest barの引き寄せ量が大きく測定されている。本実験装置のパソコンの処理速度の問題から、視覚刺激呈示時間が正確に行われていない可能性や、被験者の実験に対する熟練度などが関係し、SOAの効果が検出されなかった可能性は排除できない。他方、実際運動条件では、運動刺激始発時(SOA30ms)より、終着点付近(SOA260ms、SOA290ms)の変位量の方が有意に大きいという結果が得られた。この所見は実験 1 のpursuit条件で示された、運動刺激がtest barに遠いタイミングで呈示された知覚量より、近くで呈示されたときのtest barの引き寄せ量が大きいとの所見と一致している。

実験 2 では、固視の制御は教示のみによって行っており、実験中の被験者の固視状況はモニターしていなかった。その点でデータの信頼性については万全とは言えない。しかし、test bar の変位は reference bar

に対して測定されており、もし固視が不十分であることによるアーチファクトが取得データに強く混入していたとすれば、その効果は **reference bar** にも及び、結果的に **test bar** の変位は検出されなかったはずである。実験 2 の結果は、**reference bar** に対して十分大きな変位を示しており、その点では、実験 2 で取得したデータは本考察に耐え得る信頼性を有していると考えられる。また、図 6 および統計検定結果において、実験 1 と実験 2 とで、仮現運動刺激観察時と実際運動刺激観察時とで **test bar** の変位量に及ぼす効果が逆転しており、このことは、眼球運動を許すか許さないかの効果を示していると考えられ、その点でも固視について一定の信頼性を認めることができるだろう。

IV 総合考察

実験 1 では、眼球運動時の空間圧縮効果に伴う **test bar** の運動刺激側への引き寄せ量について測定し、**saccade** 時よりも **pursuit** 時で変位量が多いことが示された。実験 2 では、眼球運動を抑制した状態での **test bar** の運動刺激側への引き寄せ量について測定し、実際運動条件で仮現運動条件よりも大きく **test bar** が運動刺激側に引き寄せられて定位されることが確認された。眼球運動条件と運動刺激条件の両方で、**test bar** が運動刺激側に引き寄せられて知覚される原因として、注意の影響が示唆されている(十河・苧坂, 2005; Shim & Cavanagh, 2006)。そこで、注意と眼球運動との各要因が **test bar** の空間定位の変位にどのように関与しているのかを検討するために、実験 1 と実験 2 とを総合的に再分析することとした。

図 6 と統計検定の結果、眼球運動条件である **saccade** 条件と眼球運動を抑制した仮現運動条件との間には SOA 前半の 30ms、130ms 条件では有意差が認められなかったが、SOA 後半の 260ms、290ms 条件では有意に **saccade** 条件で変位量が多いことが認められた($p < .001$)。また、SOA 130ms 条件においてのみ **pursuit** 条件より実際運動条件で変位量が有意に大きいことが示された($p < .01$)。つまり、眼球運動を抑制し、潜在的注意の移動だけで運動対象を観察した場合でも、実際に眼球運動を生じさせた場合でも **test bar** の位置は変位して知覚されるが、仮現運動条件に比べ **saccade** 条件で変位量が有意に大きかったことは、**saccade** 条件では注意処理に加えて、**saccade** における見かけの位置変化の効果が加算され、仮現運動に注意を向けるより、空間圧縮が強く出たためではないかと考えられる。また、**pursuit** 条件、実際運動条件間では、変位量にほとんど差がなく同等の空間圧縮効果が認められたことは、実際運動条件と **pursuit** 条件とで注意処理の負荷がほぼ等しかったと考えることができるのではないだろうか。

Shim & Cavanagh(2006)は、空間定位の変位が、視野上の顕著な対象に向かって注意が空間的に引き込まれる効果と、実際の眼球運動が生起する前の準備的な網膜外信号である眼球運動準備信号とが相互に関係することによって、**saccade** 圧縮のような効果が認められるのではないかという仮説を提出している。この仮説の検証のためには、眼球運動準備信号が、実際に眼球運動を生じた場合と同じように機能するの否かを確定する必要がある。本研究における **saccade** 条件と仮現運動条件とでは、**test bar** の変位量自体は仮現運動条件の方が有意に低かったが、その変位量の **test bar** 呈示 SOA に伴う変化の傾向は、類似している。このことは、眼球運動準備信号が眼球運動生起時と同じような機能を有することを示唆していると考えられるのではないか。また、実際運動条件と **pursuit** 条件でも **test bar** の変位量の **test bar** 呈示 SOA に伴う変化の傾向も類似しており、眼球運動準備信号の空間定位に及ぼす機能は **saccade** に特化したものでなく、**pursuit** の準備信号も空間定位に影響を及ぼす可能性を示唆するものと考えられる。

本研究の結果と注意の関係を検討すると、固視点に向かって選択的注意を払いつつ、周辺視野に呈示される運動刺激を潜在的注意によって処理していると考えられ、さらに、**test bar** に対しても潜在的注意を向けるという注意の配分が想定される。注意のスポットライトモデルとは、特定の視覚刺激に対して、潜在的注意が重み付けられて向けられるとする仮説であり、第1に中心窩と同様に、スポットライトは視覚入力の限ら

れた領域に対して、優先的に処理を行うこと。第2にsaccadeと同様に、注意の移動の開始、実行に時間を要すること。第3にsaccadeと同様に潜在的注意は注視時における何らかの活動によって遅くなること。以上3点の特徴を有すると考えられており、このモデルはsaccadeシステムの特徴と多くの細部で類似していることが指摘されている(Mackeben & Nakayama, 1993)。また、神経生理学的観点からもsaccadeと注意の関係において、LIP野や上丘、前頭眼野の関与が認められている。Corbetta & Shulman(1998)の神経画像法を用いて行われた機能解剖学的研究から、頭頂皮質と前頭皮質に共通の神経信号が潜在的注意と選択的注意を向けることに関わっていることが知られている。このことから、注意とsaccadeが共通の神経メカニズムを基礎に持っているために、注意のスポットライトモデルのような特性を共有していることが示唆されている。また、saccadeと空間圧縮の関係についても生理学的に類似点が指摘されており、LIP野や上丘で発見されているような、saccade直前に視覚刺激に対する受容野が一時的に変形する神経細胞が関与しているであろうとされている(Ross et al., 2001)。空間圧縮作用がsaccadeに起因するならば、注意とsaccadeが神経生理学的にも脳領域を共有している点から、注意の移動のみで刺激を観察した時も空間圧縮が認められる可能性がある。

本研究ではShim & Cavanagh(2006)が用いた実験パラダイムの仮現運動刺激に加えて、実際運動刺激で実験を行い、仮現運動刺激観察時のtest barの変位量より、実際運動刺激観察時のtest bar変位量が有意に大きいことが示された。また、saccade生起時の定位の変位より潜在的注意の移動だけが生じた実際運動刺激観察時の方が変位量大きいという所見を得ており、この所見については、Shim & Cavanagh(2006)が提出した注意の移動と眼球運動準備信号によって、saccade圧縮と同じような効果が見られるという仮説だけでは空間圧縮についての説明がつかないのではないだろうか。もちろん、本研究における実験1と実験2とは独立した実験計画であり、且つ、同一の被験者によって測定を行った。したがって、本研究での分析の対象としたデータには実験実施順序による練習効果が混入している可能性がある。しかし、いずれの実験においても測定の前に実験状況や課題に馴れるための練習試行を繰り返し実施したこと、また、眼球運動の効果が、仮現運動刺激でのみ認められ実際運動刺激では認められなかったことから、本研究におけるデータの変動は練習効果では説明できないと考えられる。

上記の所見は、短時間に呈示されるtest barに注意の情報を促進させるスポットライトが当てられていないことによるものではないだろうか。一般的に脳情報処理には限界容量があると考えられており、本研究の所見は、前注意段階で入力された情報は処理容量が限られているために、空間のごく一部だけを選択し、より詳細に処理を行うというBroadbent(1958)などが提唱しているフィルタモデルを支持するものであると考えられる。本研究で顕著な視覚的目標は、仮現運動刺激と実際運動刺激であり、統制された黒背景上に呈示されている運動刺激の外側に瞬間的に呈示されるtest barは、情報としての重み付けは低く、注意のフィルタがかかっていると考えられる。この仮説に基づくと、逐次情報処理を必要としない仮現運動より、物理的に刺激の呈示時間の長く逐次位置情報を処理し続ける必要がある実際運動の方が運動印象が強く、注意の容量を多く利用することによって運動刺激外の情報には強いフィルタがかけられることになる。このことから、瞬間的に呈示されるtest barの空間定位が不安定になり、視覚的に顕著な刺激の方向に注意が引き寄せられる現象が強く現れるのではないかと考えられる。本研究において、saccade条件よりも実際運動条件、pursuit条件でのtest barの変位量が有意に大きかったことはこのことを傍証するものと考えられる。

本研究の所見は、脳処理の限界容量の効率的活用に基づいて、運動刺激に対して注意がより多く割り振られたことで、test barの定位に対しては注意の抑制的「フィルタ」がかかり、test barの定位が不安定となり、結果的に空間圧縮のような現象が見られたのではないかと考えられるのではないだろうか。これ

は、Shim & Cavanagh(2006)によって提案されている、視野上の顕著な視覚刺激に向かつて注意が空間的に引き込まれる効果と眼球運動準備信号が相互に関係することによって、saccade 圧縮のような効果が認められたのではないかという仮説を補強する結果を示すものであると考えられる。

しかし、注意の資源配分モデルは具体的な視覚情報処理としての意味は曖昧であり、実際運動と注意についてはほとんど検討されていない。したがって、本論文で提出した仮説については、神経生理学的検討も含め、さらなる知見の蓄積が必要である。

References

- Broadbent,D.E.(1958). *Perception and Communication*. Pergamon Press, London.
- Burr,D.C.,Holt,J.,Johnstone,J.R., & Ross,J.(1982). Selective depression of motion sensitivity during saccades. *The Journal of Physiology*, 333,1-15.
- Burr,D.C.,Morgan,M.J., & Morrone, M.C.(1999). Saccadic suppression precedes visual motion analysis. *Current Biology*,9,1207-1209.
- Corbetta,M.and Shulman,G.L.(1998).Human cortical mechanisms of visual attention during orienting and search. *Philosophical Transactions of The Royal Society*, SeriesB,353,1353-62.
- Currie,C.B.,McConkie,G.W.,Carlson-Radvasky,L.A.,&Irwin,D.E(2000).The role of the saccade target object in the perception of a visually stable world. *Perception&Psychophysics*, 62 ,673-683.
- Deubel, H.,Bridgeman,B., & Schneider, W.X.(1998). Immediate post-saccadic information mediates space constancy. *Vision Research*,38,3147-3159.
- Dodge,R. (1904) . The participation of the eye movements in the visual perception of motion. *Psychological Review*,11,1-14.
- Festinger,L., & Easton, A. M.(1974). Inferences about the efferent system based on a perceptual illusion produced by eye movements. *Psychological Review*,81,44-58.
- Festinger,L., Sedgwick,H. A., & Holtzman,J.D.(1976). Visual perception during smooth eye movements. *Vision Research*,16, 1377-1386.
- Honda, H. (1985) Spatial localization in saccade and pursuit-eye-movement conditions : A comparison of perceptual and motor measures. *Perception & Psychophysics*, 38, 41-46.
- Honda,H.(1990). The extraretinal signal from the pursuit –eye-movement system: its role in the perceptual and the egocentric localization systems. *Perception & Psychophysics*,48,509-515.
- 本田仁視 (1991). 視覚的位置の恒常性と眼球位置情報 *心理学評論*, 34, 17-36.
- Honda,H(1995). Visual mislocalization produced by a rapid image displacement on the retina : Examination by means of dichoptic presentation of a target and its background scene. *Vision Research*, 35,3021-3028.
- Hubbard ,T .L .(2005).Representational momentum and related displacement in spatial memory : A review of the findings. *Psychonomic Bulletin & Review* , 12, 822–851.
- Lappe, M., Awater, H., & Krekelberg, B.(2000).Postsaccadic visual references generate presaccadic compression of space. *Nature*,403,892-894.
- MacKay,D.M.(1970). Mislocation of test flashes during saccadic image displacements. *Nature*,227,731-733.
- Mack,A., & Herman, E.(1972). A new illusion: The underestimation of distance during smooth

- pursuit eye movements. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 12, 471-473.
- Mackeben, M. & Nakayama, K. (1993). Express attentional shifts. *Vision Research*, 33, 85-90.
- Matsumiya, K., & Uchikawa, K. (2003). The role of presaccadic compression of visual space in spatial remapping across saccadic eye-movements. *Vision Research*, 43, 1969-1981.
- 光藤宏行 (2011). サッカーボール眼球運動と知覚的安定. *九州大学心理学研究*, Vol. 12, 61-68.
- Morrone, M.C., Ross, J., & Burr, D.C. (1997). Apparent position of visual targets during real and simulated saccadic eye movements. *The Journal of Neuroscience*, 17, 7941-7953.
- Riggs, L.A., Merton, P.A., & Morton, H.B. (1974). Suppression of visual phosphines during saccadic eye movements. *Vision Research*, 14, 997-1011.
- Ross, J., Morrone, M.C., & Burr, D.C. (1997). Compression of visual space before saccades. *Nature*, 386, 598-601.
- Ross, J., Morrone, M.C., Goldberg, M.E., & Burr, D.C. (2001). Changes in visual perception at the time of saccades. *Trends in Neurosciences*, 24, 113-121.
- Shim, W. M. & Cavanagh, P. (2006). Bi-directional illusory position shifts toward the end point of apparent motion. *Vision Research*, 46, 3214-3222.
- 十河宏行・苧坂直行 (2005). サッカーボールに伴う視覚像の圧縮現象 *心理学評論*, 48, 207-217.