

サッカード眼球運動と先行注意移動

松原 和也*・金子 瑞樹*・塩 入 諭**・矢口 博久**

*千葉大学大学院自然科学研究科 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

**千葉大学工学部 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

Shift of Attention Preceding Saccadic Eye Movements

Kazuya MATSUBARA*, Mizuki KANEKO*, Satoshi SHIOIRI** and Hirohisa YAGUCHI**

*Graduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

**Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522

Both visual attention and saccadic eye movements select visual information from the large visual field and close relationships between them are often suggested. In this study, we conducted two experiments to investigate their relationship. In the first experiment, we measured saccadic latency in an attentive tracking stimulus to reveal the attentional effect on eye movements. We found that the latency of saccades was shorter when directed to the attended location than when directed to other locations. In the second experiment, we measured contrast sensitivity at variable location and timing before a saccade to reveal the attentional state before saccade execution. We found that sensitivity was higher near the goal of the saccade than other locations. This result suggests that attention shifts preceding saccadic eye movements.

Key words: visual attention, saccadic eye movement, attentive tracking, saccadic latency, contrast sensitivity

1. はじめに

日常生活において、われわれの視覚系には膨大な視覚情報が入力されつづけている。しかし、そのすべてを均一に処理しているわけではなく、必要な情報を選択し優先的に処理を行っている。その典型的な例として、必要な情報を選択的に中心視野で処理することができる視線移動が挙げられる。綿密な視覚情報処理を行うためには、空間解像力や感度にすぐれた中心視野で処理を行うことが不可欠である。

視覚的注意もまた情報選択の機能のひとつである。視野内の特定の位置に注意を向けることで、その位置での視覚情報処理が促進されることを示す報告は数多い。注意を向けた位置での反応時間や、フラッシュ刺激検出、コントラスト感度等の促進が典型的な効果である¹⁻⁴⁾。また、注意の影響する範囲は空間的な広がりをもちうることが知られている^{3,5,6)}。このとき、注意の効果は注意位置で最も強く、離れるに従って弱くなる勾配を示すことも報告されて

いる^{3,5)}。注意位置は視線位置と必ずしも一致するとは限らず、例えば、固視点で眼球を制御した状態で注意のみにより移動物体を追跡することも可能である^{20,21)}。

しかし、注意は眼球運動と無関係というわけではなく、多くの研究者がサッカード眼球運動と注意の間の緊密な関係を示す報告をしている⁸⁻¹²⁾。心理物理実験では、前もって注意を向けることでサッカード潜時が短くなることが知られている⁹⁻¹²⁾。Kowlerらは、サッカード位置とそれ以外の場所に刺激呈示をした場合の、文字認識の正答率を比較している。その結果は、サッカード位置ではそれ以外の位置よりも認識率が高くなることを示している¹⁰⁾。生理学的研究でも、サッカード眼球運動の計画を制御している神経メカニズムと注意の神経メカニズムの強い関連が明らかにされている¹³⁻¹⁷⁾。例えば、眼球運動の制御にかかわっている前頭眼野の細胞を刺激することによる、刺激の輝度変化検出に対する感度上昇が報告されている¹⁶⁾。

一方で、注意と眼球運動の処理の独立性を主張する研究

E-mail: kmore@graduate.chiba-u.jp

者もいる。Hunt と Kingstone は、眼球運動と手動応答の反応時間への注意の影響を比較し、手動応答には顕著な影響がある場合でも眼球運動には影響がないことを示している^{18,19)}。注意が眼球運動に影響するとしても、完全に眼球運動のための処理の一部というわけではないと考えられる。注意の働きと眼球運動の関連がどのようなメカニズムによるのかを知るためには、両者のかかわりについてより詳細な検討が必要である。

先行研究においては、注意の有無のみを問題にしているものが多く、注意の程度の効果を検討できる研究は見当たらない。典型的な実験手続きでは、手がかり刺激でサッカード位置を指定し、眼球運動を測定するとともに、その位置での文字認識など視覚課題を行うことが多い。例えば、Kowler らは、サッカード位置以外の場所に刺激呈示をして、文字認識の実験を行ったが、その結果はサッカード位置以外での認識率は同程度であった¹⁰⁾。すなわち、サッカード目的位置に注意が移動し、その注意の効果は目的位置以外には影響がないことを示している。したがって、彼女らの条件では、注意の程度による影響についての議論はできない。

本研究では、視覚的注意とサッカード眼球運動の相互作用について定量的に検討することを目的とする。特に、注意の程度がサッカードへ与える影響、およびサッカードの開始と注意の移動の時間について検討した。注意の程度の影響は、注意の勾配（注意を向けた位置からの距離に依存した注意効果の減少）を示す条件を用いることで調べることができる。注意の勾配を示す実験条件として、刺激呈示への単純応答の課題や注意追跡課題がある。本実験では、注意の追跡を利用し、単純に注意の状態を「注意を向けているか、向いていないか」に分けるのではなく、注意の強さが段階的に変化する条件を設定した。注意の強さに応じたサッカード潜時への影響を調べることで、注意とサッカード処理の関係について定量的な評価をすることが期待できる。実験1では、注意が眼球運動に与える影響を調べるために、被験者に注意による運動対象の追跡を課したうえで、追跡対象からさまざまな距離の位置へのサッカード潜時を測定した。眼球運動の準備に注意が影響するならば、事前の注意状態によりサッカードの反応時間が変化することが期待される。実験2では、眼球運動を行う直前の注意状態の時空間的推移を推定するために、サッカード直前のコントラスト感度を測定した。眼球運動の準備に注意が必要ならば、サッカードの目的位置に注意が移動することが予測される。また、注意の移動に伴い、サッカード誘発刺激からの時間経過とともに感度は変化するであろう。注意

の向けられている位置でコントラスト感度が上昇することが報告されていることから、サッカード前の注意位置とサッカード目的位置でのコントラスト感度を比較することで、注意の時間推移を調べることができる。

2. 実 験 1

眼球運動前の注意状態がその実行に与える影響を調査するために、注意追跡時のサッカード眼球運動の潜時を測定した。注意位置がサッカードに与える影響について調べるために、注意位置とサッカード位置の距離を変えた。本研究では、注意勾配が明確に示される課題として、注意による運動対象の追跡課題を用いた。注意追跡を用いる利点はもう1つある。多くの注意研究では、注意を向ける位置に手がかり刺激を呈示することで、観察者の注意を制御している。しかし、注意の状態は時間経過に伴い刻々と変化すると考えられる。手がかり刺激を呈示されたときに、その位置に注意が向くのはいつなのか、そしていつまでその位置に注意が向けられているのかは不明瞭である。注意追跡を用いると、追跡対象の位置に注意が向けられていると仮定できるため、この問題は回避できる。

この実験では、注意の向けられている位置とサッカードの目的位置の間の距離による、サッカード潜時の差を調べることを目的とする。事前の注意状態が眼球運動に影響を与えないのであれば、注意と眼球運動の目的位置との距離によらず、その潜時が一定になることが予測される。逆に注意が眼球運動に影響を与えるのであれば、注意位置からの距離に依存した潜時の変化があるはずである。

2.1 刺 激

注意追跡のために、固視点を中心に白色円盤を等間隔に6つ配置した画像 (Fig. 1 (a)) と、それを30°回転させた画像 (Fig. 1 (b)) を、ブランクフレームを挿みつつ交互に呈示する曖昧仮現運動刺激を用いた。この刺激をみると、固視点を中心に6つの円盤が時計回りか反時計回りのいずれかに回転する仮現運動が知覚される (Fig. 1)。この刺激自体は特定の運動方向を示さないが、観察者は見方（あるいは注意）によって時計回り、反時計回りの回転運動を選択的に知覚することができる。さらに1つの円盤をフレームごとに順次を選ぶことで、その円盤の回転運動を見ることができる (Fig. 1 (c))。眼球運動を制御した条件下では、この運動は観察者が順次注意を向ける位置を変えることで知覚されるため、注意による追跡の結果と考えることができる。実験では追跡対象と回転方向を指定する必要があるため、刺激呈示開始から刺激の運動が1回転するまで、6つの円盤のうち1つの円盤上にマーカーを呈示す

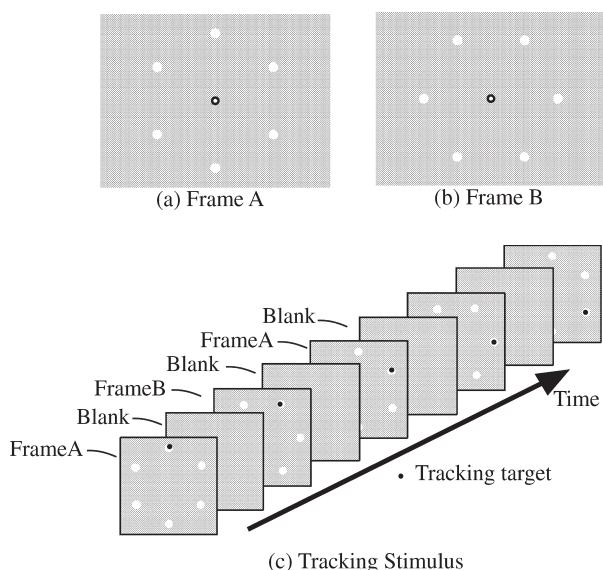


Fig. 1 Alternation of frame A (a) and frame B (b) provides an ambiguous apparent motion display. (c) The observer can see apparent motion of one disk moving in a selected direction by advancing its location step-by-step from frame to frame.

る。このマーカーで指定された円盤を追跡円盤とよび、固視点を固視した状態で、被験者はこの円盤を注意により追跡した。マーカーは1回転した段階で消えるが、その後も被験者は追跡円盤の注意追跡を続ける。この追跡刺激では、追跡中の注意の位置は追跡円盤の位置と一致していることが確認されているので、各タイミングの注意の位置が特定できる^{2-4,20,21}。

追跡中に視線の移動先を決定するためのサッカード刺激を呈示する。サッカード刺激は、追跡円盤を含む6つの円盤からランダムに1つの円盤を選択し、黒く塗りつぶしたものである (Fig. 2)。被験者は、サッカード刺激呈示後、速やかに刺激呈示位置に視線を移動させるように教示されている。サッカード刺激呈示後も追跡刺激は呈示されつづけるが、被験者は円盤の追跡を継続する必要はない。

追跡刺激は、円盤呈示フレームが 19 ms (3 ビデオフレーム)、ブランクフレームが 100 ms (16 ビデオフレーム) で構成されており、毎秒 0.7 回転の回転運動となる。円盤は固視点から半径 7° の円周上に等間隔に配置されており、それぞれの直径は 1° 、輝度は 50 cd/m^2 である。また、背景輝度は 26 cd/m^2 とした。マーカーには、円盤の半分の大きさの赤い円を用いた。サッカード刺激呈示タイミングは、刺激呈示開始から 2500 ms 後の円盤呈示フレームに呈示される。サッカード刺激呈示位置、マーカー呈示開始位置、回転方向は試行ごとに無作為に決定される。

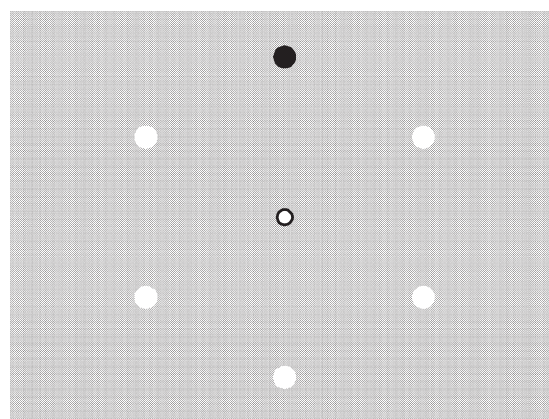


Fig. 2 Saccade cue was a black disk, which was one of six disks with brief color change in the ambiguous motion display. Observers were instructed to saccade to the indicated location as soon as possible.

2.2 手順

被験者は、固視点を固視した状態で、マーカーにより指定された円盤の注意追跡を行い、追跡中に呈示されるサッカード刺激呈示位置に速やかに視線移動を行う。サッカード刺激呈示後も追跡刺激は 1750 ms 間呈示されつづけるが、これを追跡する必要はない。

1 セッションは、追跡円盤から相対位置の異なる 6 通りのサッカード刺激呈示位置の条件と、回転方向 2 通りの組み合わせ 12 試行からなり、各被験者とも 3 セッションの実験を行った。また、比較のために、同刺激を用いて追跡を行わない条件でも測定を行った。この場合、刺激は追跡条件と完全に同一であるが、被験者にはこれを追跡しないように教示した。

刺激は、視覚刺激用画像処理ボード (Cambridge research systems, VSG2/3) を搭載したコンピュータで生成され、21 インチフラットカラーディスプレイ (SONY, GDM-F500) に呈示した。モニターの解像度は 800×600 、リフレッシュレートは 160 Hz である。50 Hz のアイカメラ (Cambridge research systems, Eyetracker) を用いて、試行中の視線位置を測定した。その視線移動のデータから、視線移動の速度が $50^\circ/\text{s}$ (50 Hz のサンプリング間隔で 1°) 以上となる点を求め、その 1 つ前のサンプル点をサッカード開始時間とし、サッカード刺激呈示からサッカード開始までにかかる時間を潜時として評価する。また、刺激観察中にまばたきをした試行はオンラインでチェックし、再試行を行う。被験者は 3 名、正常視力、もしくは矯正正常視力を持ち、心理物理実験の経験がある。うち 1 名は筆者で、他 2 名は実験の目的を知らされていない。

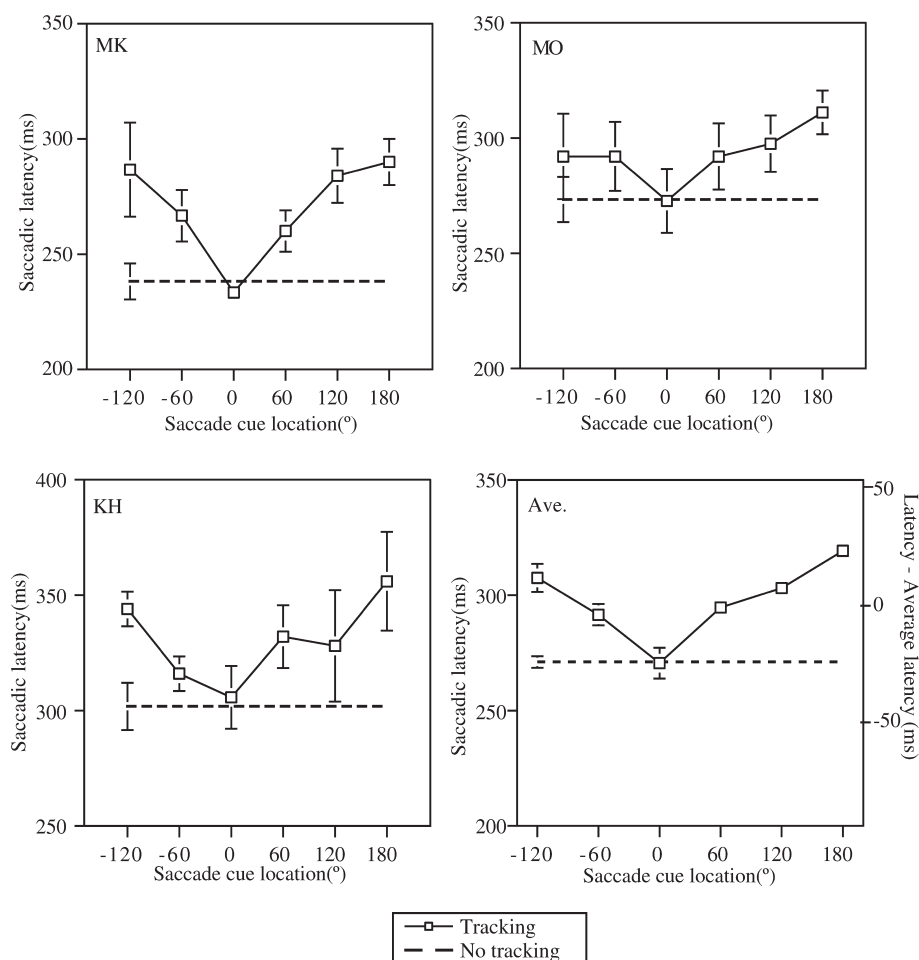


Fig. 3 The result of Experiment 1. The saccadic latency as a function of relative saccade location to the tracking target location. The horizontal dashed line indicates the result of no-tracking condition. Right side axis in the average results indicates the average across observers in terms of the difference from the average over all positions for each observer.

2.3 結 果

Fig. 3 に、サッカード刺激呈示位置によるサッカード潜時の違いを示す。横軸はサッカード刺激の呈示位置を表す。追跡円盤位置にサッカード刺激が呈示された場合を 0° とし、回転方向を正とする回転角で示している。図中の水平の破線は追跡なし条件の結果、各個人のグラフでは、試行ごとの潜時の平均とその標準誤差を示す。平均のグラフは被験者間の平均である。平均のグラフの誤差棒には、被験者ごとに各位置の潜時と平均潜時との差をとり、その値に対する被験者間の標準誤差を用いた。これは、被験者間の潜時の個人差の影響を取り除いたうえで、位置による差のばらつきをみるためである。グラフの右側に平均値からの差を示す。

注意追跡条件でのサッカード位置と潜時の関係を見ると、潜時はサッカード位置によって異なることがわかる。特に追跡位置へのサッカード (0°) で最も潜時が短く、そこから離れるほどに潜時が長くなるが見て取れる。追

跡刺激位置からの距離（絶対値）と潜時の間の相関係数は、MK, KH, MO に対して、0.95, 0.91, 0.93 で、 t 検定の結果、すべての被験者で有意な相関を示す ($p < 0.02$)。つまり、事前に注意を向けている位置付近へのサッカードは、遠い位置へのサッカードより速く行われる。この結果は、注意の強さとサッカードの速さに強い関連があることを示唆する。一方、サッカードの計画が注意によって促進されるならば、注意を向けた位置へのサッカードは追跡なし条件よりも速く行われることが予想される。これは、追跡なし条件では、特定の位置に注意が向いていないと考えるためである。しかし、追跡なし条件の結果はこの予想と異なり、追跡なし条件と 0° へのサッカードはほぼ同じ潜時となった。したがって、この結果は、注意によってサッカードの計画が促進されることを支持しない。この点については、考察にて後述する。なお、潜時の分布は標準偏差で 35 ms 以上であることから、眼球運動測定装置の 50 Hz という時間分解能 (20 ms) は、今回の測定に十分であった。

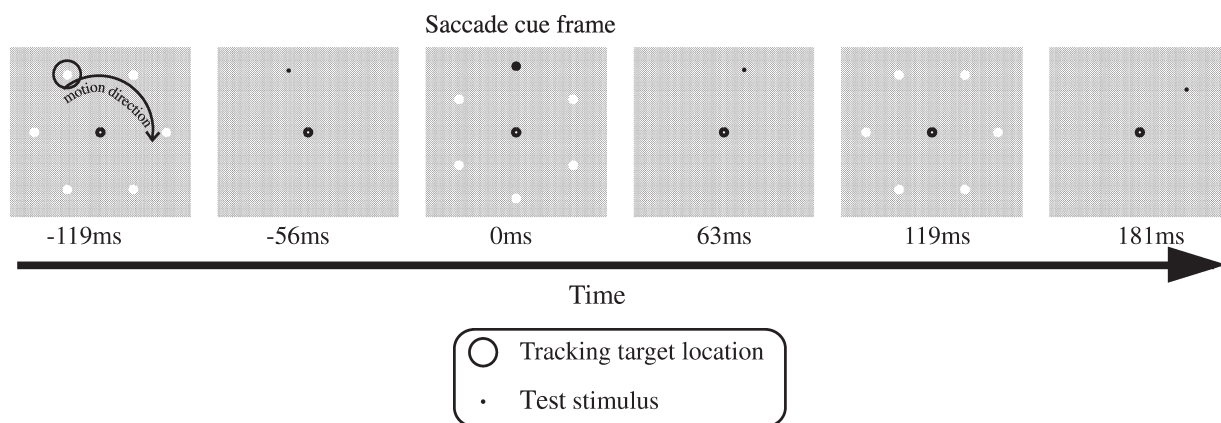


Fig. 4 The test stimulus was presented at a fixed relative location that was on 15° ahead of the tracking target of the last frame. Although the test location changed with the movement of the tracking disk (indicated with the ring in this figure), the distance from the tracking target was fixed. The location of the saccade cue closest to the test stimulus varied with the test presentation timing. The closest saccade cue location to the test was 0° in -56 ms and 63 ms conditions, 60° in 181 ms condition.

3. 実験 2

事前に注意が向けられている場所とは別の場所にサッカードする場合に、サッカードに先立ってその目的位置に注意が向けられるのであろうか。実験 2 では、この点を検討した。実験 1 の結果が示したサッカード前の注意状態の違いによる潜時の差は、サッカード目的位置への注意の移動時間を反映したものと推測することができる。一方、実験 1 の結果がサッカード刺激を検出するまでの時間のみに影響している可能性もあるが、その場合はサッカード目的位置に注意が移動するとは限らない。実験 2 は、サッカードに先立つ注意の移動の有無を調査することを目的とし、サッカード刺激呈示からサッカード開始の間におけるコントラスト感度の変化を測定した。コントラスト感度は、注意を向けた位置（追跡円盤位置）で最も高く、その位置から離れるに従い徐々に減少することが報告されている^{2,3,5)}ので、コントラスト感度を比較することで注意の位置の変化を推定することができる。実験では、感度の測定は常に追跡円盤位置で行い、サッカード位置との距離が感度に与える影響を調べた。もちろん、実際に視線が移動したあとでは、視野位置による感度変化があるので、サッカード開始前の感度の測定である。もしサッカード眼球運動の計画が注意に影響を与えないのであれば、サッカード刺激位置によってコントラスト感度は変化しないと考えられる。逆にコントラスト感度に変化があれば、サッカードの影響であると考えることができる。装置および被験者は実験 1 と同様だが、感度測定のための検査刺激がサッカード開始前に呈示される。

3.1 刺 激

追跡刺激とサッカード刺激には実験 1 と同じものを用い

る。実験 2 では、サッカード刺激呈示前からサッカード開始前の間に検査刺激を呈示し、被験者はこの検査刺激の検出の有無を応答する（イエス/ノー課題）。検査刺激は直径 $20'$ の点で、5 段階の減分コントラスト（背景より暗くなる）を用いた。減分コントラストを用いた理由は、円盤との混同をできるだけ避けるためである。呈示位置は、直前のフレームの追跡円盤から 15° の位置に、ブランクフレーム呈示から 43 ms 後（ブランクフレーム呈示時間のほぼ中間に相当する）から 19 ms 間呈示される。この呈示では、追跡円盤が等速円運動している場合に、検査刺激はその運動軌跡上にくることになる。サッカード刺激と検査刺激の SOA (stimulus onset asynchrony) はサッカード刺激呈示前の -56 ms (-56 ms 条件)、呈示後の 63 ms (63 ms 条件) と 181 ms (181 ms 条件) の 3 条件を設定し、それらは試行ごとに無作為に選択された。これらの 3 条件の検査刺激の呈示はおおの、サッカード刺激呈示直前のブランク、直後のブランク、およびその次のブランクフレームとなる。 181 ms 条件は実験 1 の結果に基づき、サッカード開始直前の条件として設定した。実験 1 の眼球運動の結果から、最も速い応答でもその潜時は 180 ms であったことがわかっているので、 181 ms 条件においても、視線は固視点に向けられている状態での測定といえる。Fig. 4 に、刺激呈示タイミングの検査刺激呈示位置の例を示す。この例は、追跡刺激が右回転で追跡円盤が 12 時の位置のときにサッカード刺激が追跡円盤上に呈示される場合で、3 つの SOA 条件に対して検査刺激の位置を示している。前述したように、検査刺激は直前の円盤呈示フレームの追跡刺激から 15° の位置に呈示している。そのため、サッカード刺激呈示フレームでの追跡位置からみると、検査刺激

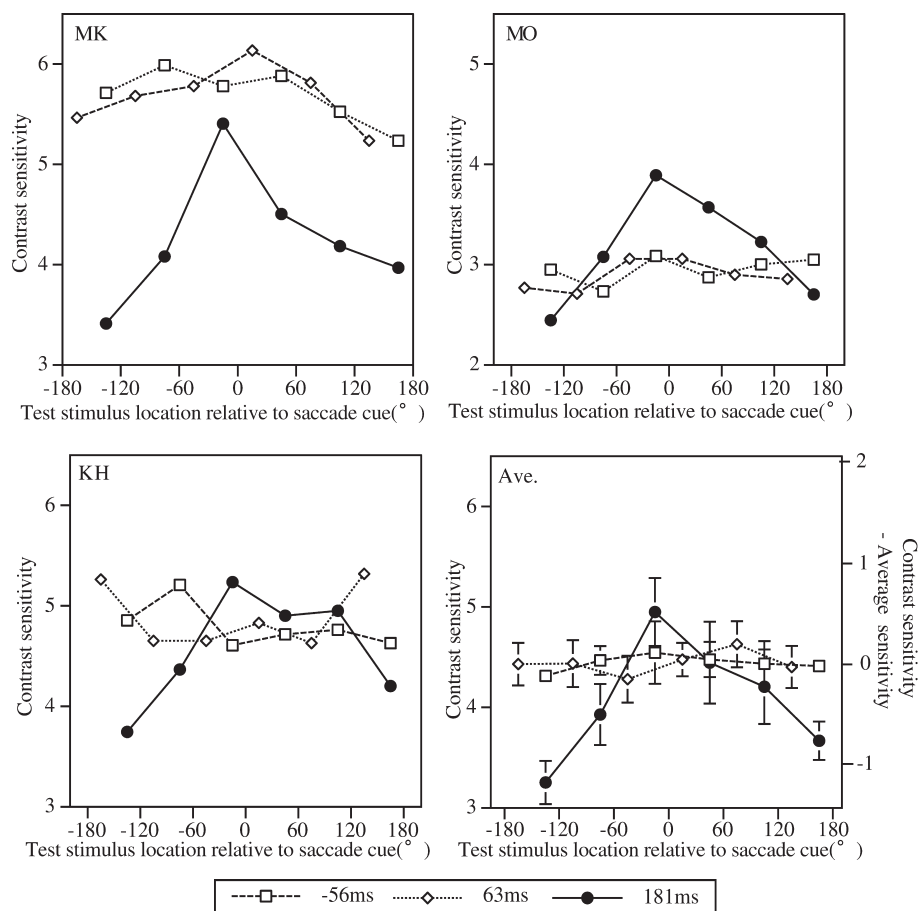


Fig. 5 The result of Experiment 2. The contrast sensitivity as a function of the relative test stimulus location to the saccade cue location. Each symbol stands for the difference of the test stimulus timing.

呈示位置は SOA によって異なる。おのおのの位置は -56 ms 条件では -15° , 63 ms 条件では 15° , 181 ms 条件では 45° となる。したがって, 181 ms 条件の検査刺激に最も近い円盤は, サッカー刺激呈示フレームの中では 60° の位置のものとなり, この円盤から見て検査刺激の位置は -15° に相当する。注意がサッカー目的位置に移動するのであれば, 60° の円盤にサッカーする場合に, 181 ms 条件での検査刺激位置と注意位置は最も近づくことになる。

3.2 手 順

追跡およびサッカーの遂行は実験 1 と同様に教示され, 被験者はそのうえで検査刺激の検出の有無を試行後に応答した。実験は恒常法により, 被験者は, サッカー刺激呈示の前後に呈示される検査刺激が見えたか否かをテンキーにより応答する。検査刺激の呈示タイミングとそのコントラスト, マーカー初期位置と回転方向, 追跡円盤からのサッカー刺激の相対位置は, 試行ごとに無作為に選択される。1 セッションは, 検査刺激の呈示タイミングが 3 通り, コントラスト 5 通り, サッカー刺激の相対位置 6 通り, 回転方向 2 通りを組み合わせた 180 試行からなり,

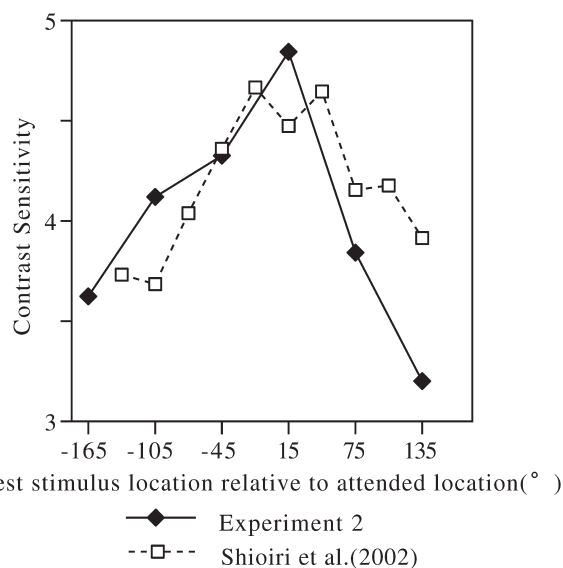


Fig. 6 Comparison with the result of Shioiri et al.⁴⁾ The horizontal axis is the distance between the test stimulus location and attended location.

各被験者は 10 セッションの実験を行った。実験で得られた心理計測関数をプロビット解析し, 検出率 50% となる

コントラストを閾値、その逆数をコントラスト感度として求めた。

3.3 結 果

被験者ごとのサッカード刺激と検査刺激の相対距離に対するコントラスト感度の結果を Fig. 5 に示す。横軸はサッカード刺激呈示位置を 0° とした検査刺激呈示位置、縦軸はコントラスト感度を示す。平均のグラフは被験者間の平均で、誤差棒は Fig. 3 と同様に求めたものを用いる。

いずれの被験者も、サッカード刺激呈示前の条件 (-56 ms 条件) では、サッカード刺激呈示位置によらずコントラスト感度はほぼ一定となった。また、サッカード刺激呈示後 63 ms 条件でも呈示位置の影響はほとんどなく、感度も呈示前の条件と変わらない。一方、最も遅いタイミングである呈示後 181 ms 条件では、サッカード刺激と検査刺激が最も近いときに、コントラスト感度が最も高くなることが見て取れる。これは、追跡位置とは異なる位置 (サッカード刺激呈示フレームで追跡刺激から 60° の位置) へのサッカードであり、サッカード刺激呈示位置に注意が移動した結果であると解釈できる。この結果は、サッカードに先行して注意が移動することを支持するものである。また、サッカード刺激呈示前と呈示後 63 ms 条件の結果に差がないことから、サッカード刺激呈示後 63 ms ではサッカード刺激の影響をほとんど受けないことがわかる。すなわち、サッカード前の注意の移動は、刺激呈示から 63 ms 以上経過してから行われているといえる。

一方、 181 ms 条件における位置の差 (注意の効果) は、特定位置に注意を向けた場合と同程度である。Fig. 6 は、 181 ms 条件の結果と、Shioiri らの運動刺激に対する注意追跡中の追跡位置とそれ以外の位置でのコントラスト感度を測定した結果を比較したものである⁴⁾。両者の位置による感度変化は非常に似ていることから、 181 ms 条件ではサッカード位置への注意の移動が終了していると考えることができる。つまり、刺激呈示から 63 ms では注意の移動は開始されず、 181 ms 後にはすでに終了していることが示唆される。また、この感度分布の類似は、視線を移動しないで注意を向ける場合の注意と、サッカードに先行して移動する注意が同じメカニズムであることを支持する。

181 ms 条件とそれ以外の条件を比較すると、被験者によって異なる傾向がみられる。被験者 MK では 181 ms 条件で感度低下がみられるが、他の被験者についてはみられない。この MK の感度低下の一因として、サッカード抑制の影響が考えられる。サッカード抑制はサッカード眼球運動中に起こる感度低下であるが、サッカード開始の数十 ms 前から抑制が始まることが知られている^{22,23)}。MK は

実験 1 でサッカード潜時が他 2 名よりも短く、追跡位置へのサッカード潜時は MK で 233 ms だったのに対して、MO では 272 ms, KH で 305 ms であった。このことから、MK にとっては他 2 名よりも 181 ms 条件がサッカード実行により近い条件であったことがいえ、最もサッカード抑制の影響を受けやすいことが予想される。しかし、この条件でも、サッカード抑制の影響の大小によらず、位置に依存したコントラスト感度の変化は 3 名の被験者で同様である。したがって、サッカード抑制そのものと位置による感度変化とは無関係であり、サッカード抑制の影響は本研究の結論に影響しない。

4. 考 察

実験より、追跡対象と近い位置へのサッカードは短い潜時で起こること、サッカードに先行してサッカードの目的地を中心に感度が上昇することが示された。これらは、注意がサッカードの潜時に影響を与え、またサッカードに先行した注意の移動があることを意味する。さらに、潜時は注意追跡位置からの距離に依存して変化することから、事前に向けられていた注意の程度が低いほど潜時が長くなることが示唆される。この場合、注意位置 (注意の中心) のみではなく、その周辺においても、注意の程度に応じてサッカードが促進 (あるいは抑制) されたことになる。サッカード眼球運動の処理が、注意の程度と量的に関連することを示している。これは今後、注意とサッカードの関連についての詳細な検討を可能にする知見といえる。

ここでは、この注意とサッカードの関連にかかわるメカニズムについて考察する。まず第 1 に、実験 1 で示された注意状態による潜時の変化がサッカード位置への注意移動時間の反映であるか、サッカード計画や実行時間に直接与えた結果であるか、あるいはその前提となるサッカード刺激の検出時間に影響を与えた結果であるかについて考察する。まず注意の移動であるが、追跡刺激の位置からサッカード位置に注意が移動するときに、その距離に応じて要する時間が変化するならば、距離が離れるにつれて潜時が長くなると考えられる。しかし、注意の移動時間は距離に依存しないとの報告がある^{24,25)}。これに従えば、サッカード位置への注意移動時間の違いで、今回の結果の注意位置からの距離に依存した潜時の違いを説明することはできない。

では、サッカード刺激検出への注意の効果が、この潜時の差の要因であろうか。サッカード刺激の検出に対する注意による感度上昇や応答時間の短縮から、この点を推定できる。最も速い条件と最も遅い条件の潜時の間には約 50

ms の差があるが、これは一般的な反応時間への注意の効果と同程度である^{6,7)}。すなわち、サッカード刺激検出にのみ注意の効果があり、刺激検出後のサッカードの計画には事前の注意の効果はないという解釈が可能である。ただし、刺激検出への注意の影響だけで実験結果を説明するには問題が残る。サッカードに先立ち目的位置に注意が移動するのであれば、注意移動の不要な条件（追跡位置にサッカードする場合）とそれ以外の条件では、注意の移動時間に相当する潜時の差が生じると考えられる。注意の移動時間が距離に依存しないという報告に従い、距離に依存しない一定の注意移動時間が必要だとすると、追跡刺激位置以外へのサッカードはその分一様に潜時が長くなることが予測される。この効果を感度の空間分布の効果に加えたものが潜時に影響するはずなので、潜時は感度の効果により注意位置を谷とする V 字型になり、注意位置のみ他よりさらに潜時が短縮されることになる。しかし、実験 2 や先行研究の感度分布 (Fig. 6) が潜時の分布と類似しており、注意位置における急激な潜時の短縮はみられない。これは、追跡刺激位置以外へのサッカードに対して潜時の増大の効果があるという仮定のもとでは、実験結果を刺激検出への注意の影響のみで説明することに否定的な事実である。サッカード刺激検出への注意の効果のみによる説明は単純であるが、必ずしも最善ではない。

一方、サッカード計画への注意の影響という意味では、注意の強さ（目的位置に対応する細胞の活性度）の影響が考えられる。サッカードの開始が関連する細胞応答がある値を超えることによるとすると、そこに注意の強さが直接影響するかもしれない。前頭眼野や上丘というサッカードの制御に関連する部位の細胞に電気刺激を与えることで、注意を向けた位置での感度が上昇することが知られている¹⁶⁾。これは、注意の制御と眼球運動の制御が共通であることを示唆していて、逆に注意を向けることによって眼球運動制御信号は増大するものと思われる。注意と眼球運動の制御が共通であれば、注意の強さとサッカード潜時の間に相関があると考えられる。筆者らの実験結果は、この効果とサッカード刺激の検出感度への影響とを分離できないため、それぞれの要因のサッカード潜時への寄与の大きさを議論することはできない。中心視野に矢印刺激を呈示するなど、サッカード位置の指定がその刺激に対する感度に影響されない実験などをすることにより、今後検討することが必要である。

第 2 に、実験 2 の結果について考察する。実験 2 においてサッカード刺激位置で感度が最大となった理由として、注意がサッカードに先行して注意位置に移動したというほ

かにも、サッカード刺激そのものが注意の誘導効果を引き起こしたという説明も可能である。この場合、サッカードが実行されなくても感度の上昇が期待されるので、サッカードと直接関係ない要因ともいえる。筆者らの用いた刺激は円盤の明滅に伴う時間変化を多く含むため、通常の注意実験で用いられる一様背景上に呈示される手がかり刺激とは異なり、自動的に強く注意を引きつけるとは考えにくい。また、被験者は意識しないとサッカードすることは難しいと報告している。しかし、その効果がまったくないとはいえない。したがって、今後この点を明確にするためには、サッカード眼球運動とサッカード誘発刺激の効果を分離する実験により、さらに詳細に検討することが必要である。ここでは、実験 2 の結果がサッカードに関連した注意変化であることの妥当性について一点を指摘する。それは、注意の変化が 180 ms 程度で終了していてサッカードに先行すると考えると、時間的には辻褄があうということである。サッカード潜時が 250 ms 程度であれば、サッカード計画処理の一部としての注意移動が数十 ms 先行するのは神経系の働きとしても妥当といえるだろう。例えば、サッカードの計画と注意のいずれにも深く関与しているといわれている前頭眼野や上丘で、サッカード目的位置に対する細胞が発火することで、その位置への注意と同じ効果をもたらすと考えられる。その後に眼球運動の実行が続く、運動系への伝達が行われ、数十 ms 後に眼球が動きはじめると考えればよいからである。

第 3 に、実験 1 の結果が注意位置での処理の促進であるか、そこ以外での抑制であるかについて検討する。実験 1 の結果で、追跡条件で追跡なし条件より常に長い潜時を示したことは、実験前には予想しなかったことである。これは注意を向けていない位置へのサッカード潜時が長くなると解釈でき、その場合、注意によってサッカードの計画が促進されるとはいえない。しかし、追跡の有無という観察者への負荷の差が、サッカードの遂行に影響を与えた可能性も考えられる。実際に、注意を向けることが向ける場所にかかわらず潜時を長くすることが報告されている⁸⁾。そうであるならば、負荷の軽い追跡なし条件で、注意追跡条件との潜時を直接比較することは好ましくない。負荷の違いが別の効果を与える可能性もある。例えば、今回の実験ではサッカード刺激の呈示タイミングは固定されていたため、特定の刺激に注意を向ける必要のない追跡なし条件では、呈示されるタイミングに注意を集中することが可能であったとも考えられる。これに対して追跡条件では、追跡刺激に注意を向けつづける必要があるため、呈示タイミングにまで注意を向けることが困難であったと考えられ

る。この条件による違いが、結果に影響を与えた可能性もありうるだろう。いずれにしても、実験1の結果が、注意を向けることでサッカードが速くなることを示したものか、あるいは注意を向けていない位置へのサッカードが遅くなることを示したものかについては、さらに詳細な検討が必要である。

最後に本実験結果は、サッカード潜時の測定が、注意位置およびその広がり測定する手法を与えることを指摘したい。実験1の結果が示したように、注意を向けている位置からの距離に依存してサッカード潜時は変化する。すなわち、サッカード直前の注意の状態が潜時に影響を与える。したがって、サッカード潜時の差異は、注意状態の差異を反映することが期待される。つまり、潜時がより短くなる場所には、より強い注意が向けられていると考えられる。このようにサッカード潜時の測定とその比較は、注意の効果を測定する有効な手段となると思われる。今回の実験では、空間分布を注意状態の違いとして用いたが、注意を向けた位置での課題の差異や、注意を引きつけやすい刺激の調査等にも潜時測定による比較は有効であろう。

5. ま と め

実験1の結果より、注意を向けていない位置へのサッカードは、注意を向けている位置よりも潜時が長くなることが示された。また、注意の潜時に対する効果は注意位置からの距離に依存し、事前の注意の程度（強さ）に応じた潜時となった。この結果は、注意状態がサッカードの計画の処理時間に影響することを示唆する。ただし、サッカード刺激検出への影響などを検討する必要がある。実験2の結果より、視線移動に先立って感度の中心がサッカード刺激呈示位置へと移動することが明らかになった。これは、サッカードに先行してサッカード位置へ注意が移動するという考えと一致する結果である。また、注意の移動に必要な時間は、60 ms から 180 ms の間であることが推定された。

文 献

- 1) M. I. Posner: "Orienting of attention," *Q. J. Exp. Psychol.*, **32** (1980) 3-25.
- 2) 塩入 諭: "視覚的注意—現象とそのメカニズム—", *光学*, **28** (1999) 261-272.
- 3) S. Shioiri, P. Cavanagh, T. Miyamoto and H. Yaguchi: "Tracking the apparent location of targets in interpolated motion," *Vision Res.*, **40** (2000) 1365-1376.
- 4) S. Shioiri, K. Yamamoto, Y. Kageyama and H. Yaguchi: "Smooth shifts of visual attention," *Vision Res.*, **42** (2002) 2811-2816.
- 5) C. J. Downing: "Expectancy and visual-spatial attention: Effects on perceptual quality," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, **14** (1988) 188-202.
- 6) C. W. Eriksen and J. D. St. James: "Visual attention within and around the field of the focal attention: A zoom lens model," *Percept. Psychophys.*, **40** (1986) 225-240.
- 7) J. Theeuwes, A. F. Kramer and P. Atchley: "Spatial attention in early vision," *Acta Psychol.*, **108** (2003) 1-20.
- 8) B. Fisher and H. Weber: "Express saccades and visual attention," *Behav. Brain Sci.*, **16** (1993) 553-610.
- 9) M. R. Harwood, L. Madelain, R. J. Krauzlis and J. Wallman: "Spatial scale of attention strongly modulates saccade latency, but not by modulating stimulus saliency," *J. Vision*, **3** (2003) 685a.
- 10) E. Kowler, E. Anderson, B. Doshier and E. Blaser: "The role of attention in the programming of saccade," *Vision Res.*, **35** (1995) 1897-1916.
- 11) R. Walker, R. W. Kentridge and J. M. Findlay: "Independent contributions of the orienting of attention, fixation offset and bilateral stimulation on human saccadic latencies," *Exp. Brain Res.*, **103** (1995) 294-310.
- 12) W. Zhou and W. M. King: "Attentional sensitivity and asymmetries of vertical saccade generation in monkey," *Vision Res.*, **42** (2002) 771-779.
- 13) M. Corbetta, E. Akbudak, T. E. Conturo, A. Z. Snyder, J. M. Ollinger, H. A. Drury, M. R. Lineweber, S. E. Peterson, M. E. Raichle, D. C. Van Essen and G. L. Shulman: "A common network of functional areas for attention and eye movements," *Neuron*, **21** (1998) 761-773.
- 14) J. E. Hoffman and B. Subramaniam: "The role of visual attention in saccadic eye movements," *Percept. Psychophys.*, **57** (1995) 787-795.
- 15) A. A. Kustov and D. L. Robinson: "Shared neural control of attentional shifts and eye movements," *Nature*, **384** (1996) 74-77.
- 16) T. Moore and M. Fallah: "Control of eye movements and spatial attention," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **98** (2001) 1273-1276.
- 17) T. Moore, K. M. Armstrong and M. Fallah: "Visuomotor origins of covert spatial attention," *Neuron*, **40** (2003) 671-683.
- 18) A. R. Hunt and A. Kingstone: "Covert and overt voluntary attention: Linked or independent?" *Cognit. Brain Res.*, **18** (2003) 102-105.
- 19) A. R. Hunt and A. Kingstone: "Inhibition of return: Dissociating attentional and oculomotor components," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, **29** (2003) 1068-1074.
- 20) F. A. J. Verstraten, P. Cavanagh and A. T. Labianca: "Limits of attentive tracking reveal temporal properties of attention," *Vision Res.*, **40** (2000) 3651-3664.
- 21) F. A. J. Verstraten, I. T. C. Hooge, J. Culham and R. J. A. Van Wezel: "Systematic eye movements do not account for the perception of motion during attentive tracking," *Vision Res.*, **41** (2001) 3505-3511.
- 22) S. Shioiri and P. Cavanagh: "Saccadic suppression of low-level vision," *Vision Res.*, **29** (1989) 915-928.
- 23) 塩入 諭: "サッカード抑制, 視野安定およびサッカード統合", *眼球運動の実験心理学* (名古屋大学出版会, 1993) pp. 101-122.
- 24) R. Remington and L. Pierce: "Moving attention: Evidence for time-invariant shifts of visual selective attention," *Percept. Psychophys.*, **35** (1984) 393-399.
- 25) G. Sperling and E. Weichselgartner: "Episodic theory of the dynamics of spatial attention," *Psychol. Rev.*, **102** (1995) 503-532.