

注意追跡中のサッカード眼球運動軌跡の歪み

松原 和也・村上 郁也

東京大学大学院 総合文化研究科

〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

1. はじめに

視覚情報の選択機構である眼球運動と視覚的注意には密接な関係があることが報告されている。例えば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とは強い関連があることが明らかにされている。眼球運動の制御に関わる前頭眼野の細胞に域下の微小電気刺激を与えることで、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¹⁾。

しかし一方で、注意位置と視線位置が必ずしも一致しないという事実がある。どこかを固視した状態で、それとは別の位置に注意をむけることは容易に出来、さらには注意により運動物体を追跡することも可能である²⁻⁴⁾。このような意識的に向ける内因的注意の場合のみではなく、突然呈示された刺激に対しては自動的に注意が向くことが知られている。このような外因的注意の働いている状態では、明らかに視線移動が行なわれる以前に注意が刺激呈示位置へと向けられている。注意と視線位置を独立に制御できるため、次の視線移動の目的位置とその直前に注意を向けている位置とが一致しないことは日常的にありえることである。

サッカード前の注意位置と、サッカード眼球運動の関連について興味深い報告がある。サッカード標的の近傍に注意を惹きつける刺激が存在すると、眼球運動の軌跡がそれを避けるように歪むというものである⁵⁻⁷⁾。サッカードの運動

指令と注意のメカニズムに関わりがあることが示唆される。この現象は外因的注意、内因的注意の双方で起こることが示唆されている。外因的注意を制御するためには、突然の注意誘導刺激の呈示が利用され、刺激呈示直後にサッカードを行なう。このような条件では、注意の影響であるのか、注意誘導刺激が存在すること自体が影響するのかが不明瞭となる。内因的注意では、被験者にどこに注意を向けるかを手掛り刺激により示すことで、制御を行なう。しかし、注意が本当に指示された位置に向けられているかは、外部から観察できないといった問題がある。さらに、例えば Van der Stigchel ら⁶⁾ は中心に手掛り刺激として棒刺激を呈示しているが、眼球運動中もその刺激は呈示されたままであり、やはり手掛り刺激が存在していること自体が眼球運動に影響をあたえている可能性を免れない。

そこで本研究では、内因的注意を正確に制御し、また眼球運動中に手掛り刺激という異物が存在しない状態で、注意が眼球運動軌跡にどのような影響を与えるかを調査した。注意の時空間的な位置を正確に制御するために、観察者に注意のみによって移動物体を追跡する課題を行なわせた。追跡が確実にに行なわれているかぎり、注意位置は追跡対象の移動に一致することが期待できる²⁻⁴⁾。また、追跡対象と均質な複数の移動物体を混ぜることで、注意追跡対象とそれ以外の物体とを弁別しうるのは観察者の注意のみとなる。この状態でサッカードを行なえば、それは従来の研究で存在し続けた手掛り刺激という異物を取り除くことができる。本実験ではこの注意追跡を用いて観察者の注意を制御し、

このときのサッカード眼球運動の様子を測定し、その軌跡の歪みについて調査を行なった。

2. 実 験

2.1 装置

刺激は視覚刺激作成装置 (ViSaGe, Cambridge Research Systems) を接続したコンピュータにより生成し、22 インチのフラットカラーディスプレイ (MITSUBISHI, RDF223H) に呈示した。モニタの解像度は 800×600 、リフレッシュレートは 160 Hz である。観察距離は 80 cm、顎台により頭部を固定した。実験中の視線移動の様子を、ビデオ式アイカメラ（被験者のうち 3 名は EyeLink II, 2 名は EyeLink 1000 を使用、いずれも SR Research）により、時間解像度 500 Hz で右眼の視線移動を測定した。

2.2 刺激

注意追跡刺激として、等間隔に配置された 6 つの白色円盤が固視点を中心に等速円運動する連続運動刺激を用いた（図 1）。被験者は固視点を固視した状態で 1 つの円盤を追跡する。追跡対象を特定するために、回転開始から 500 ms 間、6 つの円盤のうち 1 つだけ黒色で呈示した。被験者にはこの黒色で呈示した追跡対象の円盤を注意追跡するよう指示した。追跡対象は回転開始から 500 ms 後に他の 5 つと同じ白色円盤になるため、注意を向けていないと区別がつかない。追跡対象が白色円盤に変化した後も、被験者は最初に示された追跡対象の注意追跡を続行する。観察者がこの追跡対象を正確に追跡できているならば、注意の時空間的な推移は追跡対象の円盤の位置と一致することが期待できる。円盤は固視点から 7 deg の同心円上に配置されており、その大きさは直径 1 deg、背景は 27 cd/m^2 、白色円盤は 56 cd/m^2 である。刺激の回転速度は 60, 120, 180, $240^\circ/\text{s}$ の 4 通りを用いた。

サッカード試行では回転開始から 1750 から 3000 ms の間の無作為なタイミングから 100 ms 間、1 つの円盤が黒色に変化し、これをサッカード標的とした。サッカード標的が白色円盤へと再変化した後も、刺激の回転は継続してい

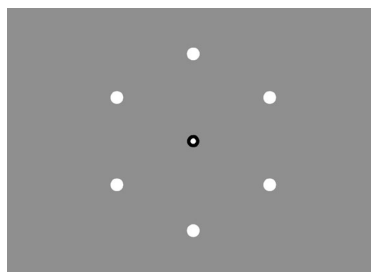


図 1 追跡刺激。6 つの円盤が固視点を中心に回転する。

る。被験者にはこのサッカード標的の呈示された位置に速やかに視線移動するよう指示した。サッカード標的となる円盤は試行毎に 6 つの円盤から無作為に選択される。追跡対象の円盤がサッカード標的となる条件では、注意位置にサッカード標的が呈示されることになり、事前の注意位置とサッカード目的位置が一致する条件となる。このサッカード標的が呈示される条件を 0° 条件と呼び、以後は追跡対象からの回転方向を正とする相対位置を回転角で、それぞれのサッカード標的の条件を呼称する。例えば、追跡対象に対しての 1 つ先行した円盤を 60° のサッカード標的と呼ぶ。

確認試行ではサッカード標的は呈示されず、回転終了時に各円盤の付近に 1-6 の数字を呈示する。被験者は追跡対象の円盤がどの円盤であったかをテンキーにより応答する。

2.3 手順

被験者は 5 名でいずれも正常視力、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、他は実験の目的を知らされていない。測定を開始する前に確認試行のみを用いて、最も速い追跡刺激でも 100% の正答率を得られるまで、注意追跡の訓練を十分に行なった。

セッションを通して回転速度は固定した。1 セッションはサッカード試行として回転方向（時計／反時計回り）とサッカード標的（6 つの円盤）の組み合わせを 5 セットで 60 試行、確認試行を 20 試行とし、この計 80 試行を無作為な順に呈示する。被験者は固視点を固視した状

態で、追跡円盤の注意追跡を行なう。サッカード試行では注意追跡中に呈示されたサッカード標的の位置に速やかに視線を向ける。確認試行では回転停止後に追跡していた円盤がどれであったかをテンキーにより応答する。被験者には実験中の確認試行の正答率が 90% 未満の場合には再試行を行なうことを予め伝えている。これにより注意追跡を正確に行なうように意識することを期待できる。サッカード標的呈示後、視線移動速度が 22 deg/s を超えた点をサッカード開始とし、その後 22deg/s を下回った点をサッカードの終了として評価する。

3. 結果と考察

図 2 に 240°/s 条件での軌跡の歪みを示す。サッカード始点と終点を結ぶ直線からの視線移動軌跡の距離をサッカード標的になった円盤毎に平均したものである。歪みの大きさは始点と終点を結ぶ直線から回転方向にずれている場合であれば正に、逆方向へのズレは負として扱う。60° の円盤がサッカード標的となった条件では回転方向、すなわち注意追跡対象の位置から離れる方向に軌跡が歪んでいるということがわかる。一方で -60° に対するサッカードでは、回転方向の逆にサッカード軌跡が歪んでおり、これもまた追跡対象から離れる方向へサッカード軌跡が歪んでいる。これらのことからサッカードの歪みは、追跡刺激の運動によらず、注意を向けていた位置とサッカード標的の相対的な位置関係が重要であることがわかる。またその歪みかたは、注意を向けた位置から離れる方向であり、従来の報告に一致する。各サッカード標的に対する曲線を積分したものを歪みの指標として用い、これを速度条件毎に示したものが図 3 である。横軸は注意追跡刺激に対するサッカード標的の相対呈示位置である。この図から事前の注意位置から離れる方向へ軌跡が歪む傾向は、追跡刺激の回転速度を変化させても同様であることがわかる。刺激の運動自体がこの歪みを引き起こしているわけではない。手掛け刺激などが物理的には存在しない条件でも、歪み

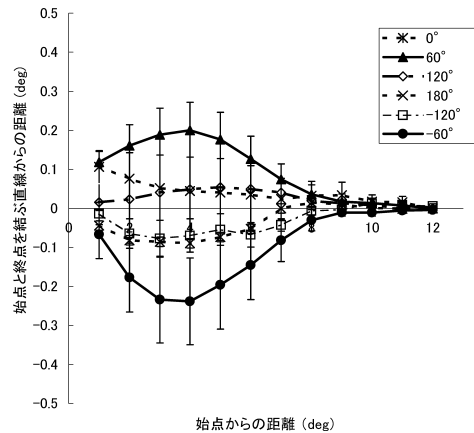


図 2 240°/s でサッカード軌跡の歪み。N=5. $\pm 60^\circ$ で歪みが大きい。

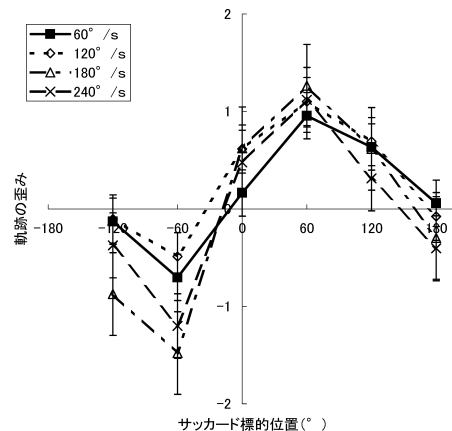


図 3 サッカード軌跡の歪み。追跡対象から離れる方向へ歪む。

は内因的注意との関係により生じることが示唆される。

サッカード標的の消失位置とサッカード終点のズレを図 4 に示す。縦軸は回転方向を正とする回転角で終点のズレを表し、横軸はサッカード標的の追跡円盤からの相対位置である。全ての条件でズレの大きさは 0 より大きく、実際のサッカード標的の位置よりも回転方向に先行した位置へ視線移動をしている。また刺激の回転速度が速くなるほど、ズレが大きくなる傾向が見られる。これらのズレはフラッシュラグ効果によるものである可能性が考えられる。フラッシュラグ効果とは運動物体がフラッシュ刺激より先行して知覚される現象である^{8,9)}。これによ

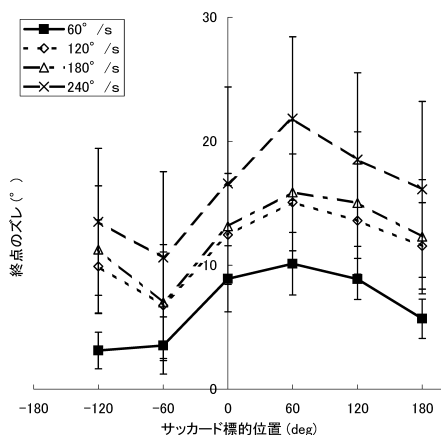


図4 サッカーボール終点のズレ。速度が速いほどズレが大きく、注意位置から離れる方向へのズレの大きさが変化する。

り実際のサッカーボール標的が呈示されていた時間と、円盤の運動の知覚にズレが生じた結果、サッカーボール標的の定位にもズレが生じたことが出来る。速度が速いほどズレが大きくなることも、フラッシュラグ効果と考えれば自然である。

注意追跡刺激に対するサッカーボール標的の相対位置によってズレの大きさが異なることがデータから示唆される。特に注意追跡位置に近い60°と-60°を比較すると、60°ではズレが大きくなる傾向にある。サッカーボール前の注意位置がサッカーボール終点の定位に影響を与えており、軌跡の歪みと同様に注意位置から離れる方向へと作用していることがわかる。このズレの大きさの変化は注意追跡位置に隣接する±60°の円盤で最も差が大きいことから、注意が強く影響する条件ほどサッカーボール終点の定位のズレも大きくなることが示唆される。

4. ま と め

注意を制御した条件でも、サッカーボール眼球運動の軌跡、および終点の定位はサッカーボール前の注意位置から離れる方向へと歪むことが示された。これは事前に注意を向けていた位置への抑制効果が、サッカーボールの運動指令へ影響するためだと考えられる。またサッカーボール軌跡の歪み

は運動速度に影響されないことが示唆された。刺激の運動成分自体は今回の歪みに影響を与えず、注意位置からの距離こそが重要であると考えられる。回転速度が速いほど注意追跡は難しくなるため、より追跡対象に注意が集中している条件と言えるかもしれない。であるならば、注意の強さもまたサッカーボールの歪みに影響を与えていないということになる。事前に向けていた注意位置からの距離だけが重要なのか、向けられていた注意の強さが重要であるのかは興味深い点ではあり、今後の課題である。

文 献

- 1) T. Moore, K. M. Armstrong and M. Fallah: Visuomotor origins of covert spatial attention. *Neuron*, **40**, 671–683, 2003.
- 2) K. Matsubara, S. Shioiri and H. Yaguchi: Spatial Spread of Visual Attention while Tracking a Moving Object. *Optical Review*, **14**, 57–63, 2006.
- 3) S. Shioiri, K. Yamamoto, Y. Kageyama and H. Yaguchi: Smooth shifts of visual attention. *Vision Research*, **42**, 2811–2816, 2002.
- 4) F. A. J. Verstraten, P. Cavanagh and A. T. Labianca: Limits of attentive tracking reveal temporal properties of attention. *Vision Research*, **40**, 3651–3664, 2000.
- 5) S. Van der Stigchel, M. Meeter and J. Theeuwes: Eye movement trajectories and what they tell us. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, **30**, 666–679, 2006.
- 6) S. Van der Stigchel, M. Meeter and J. Theeuwes: Top-down influences make saccades deviate away: The case of endogenous cues. *Acta Psychologica*, **125**, 279–290, 2007.
- 7) B. M. Sheliga, L. Riggio and G. Rizzolatti: Spatial attention and eye movements. *Experimental Brain Research*, **105**, 261–275, 1995.
- 8) R. Nijhawan: Motion extrapolation in catching. *Nature*, **370**, 256–257, 1994.
- 9) I. Murakami: A flash-lag effect in random motion. *Vision Research*, **41**, 3101–3119, 2001.