

## 視覚的注意の集中がもたらすマイクロサッカードの抑制効果

遠藤 翔<sup>1</sup>, 小濱 剛<sup>2</sup>

### 要旨

注視時に不随意に発生するマイクロサッカードの発生機序と、視覚的注意機構との関与を示す報告が相次いでいる。先行研究の多くは、注意の移動に伴ってマイクロサッカード発生頻度が増加することを指摘しているが、一方では、注意の集中によってマイクロサッカード発生頻度が低下する可能性を示唆する報告もあり、いずれの見解が妥当であるのか結論は得られていない。そこで本研究では、注意の集中によりマイクロサッカードの発生頻度が減少することを仮定し、注視を維持した状態で注意の集中度を制御する実験を行い、このときのマイクロサッカードの発生頻度について解析を行った。実験課題は、モニタ中央に連続的に表示される英字を妨害刺激とし、ランダムなタイミングで表示される明るさの異なる英字を目標刺激として読み取るものであり、輝度コントラストが高い場合を High Contrast 条件 (HC)、低い場合を Low Contrast 条件 (LC)、文字の読み取りを課さない場合を Control 条件とした。これら3つの条件で注意の集中度をコントロールし、このときの眼球運動を計測してマイクロサッカード発生頻度の解析を行った。注意の集中度合いを検証するため、文字の読み取りと同時に、周辺視野に配置した低い空間周波数のガボールパッチを一定速度で左右いずれかに回転運動させ、回転方向の検出を課した。実験の結果、LC条件においてマイクロサッカードの発生が抑制される傾向が示され、ガボールパッチの検出率から、この条件において注意がより集中されていたことが確認された。このことから、注意の集中によりマイクロサッカードが抑制されることが示唆された。

### 1. 緒論

固定された一点を凝視する場合であっても、眼球は完全に静止すること無く、絶えず微小な運動を行っている。これを固視微動と呼び、一般にトレマー、ドリフト、マイクロサッカードに分類される<sup>(1)(2)</sup>。固視微動が視覚の形成において担う役割については様々に議論されているが、中でも、マイクロサッカードは視覚における「注意」と密接な関わりを有することが知られている。注意とは、感覚器官から同時並列的に入力される膨大な感覚情報の中から、必要な情報だけを優先的に処理する機能を言う。注意は、感覚情報に対してサイズや通過帯域が可変なフィルターのように振る舞い、局所的に集中させて高精細な情報を通過させたり、広域に拡散させて粗い大局的な情報を通過させたりと、周囲の状況に応じてダイナミックに変動する。

Laubrockらによると、注視を維持した状態において、周辺視野に注意を誘導するような視覚刺激(cue)を与えた場合、cueの提示と同時にマイクロサッカードの発生頻度が減少し、cueの提示から300ms程度の時間が経過した後、増加に転じることが示されている<sup>(3)</sup>。一方で、Kohama & Usuiによると、中心窩、すなわち視野の中央に提示された視標に注意を集中させた場合と、視野中央の視標に注視を維持したまま、周辺視野の視標に注意を分散させた場合を比較すると、注意を集中させた場合においてマイクロサッカード発生頻度が抑制されることが明らかにされている<sup>(4)</sup>。

これらの先行研究の他にも、注意とマイクロサッカード発生頻度に関する報告がなされているが<sup>(5)(6)</sup>、マイクロサッカードの発生頻度が注意の移動により増加するのか、あるいは、注意の集中に伴って減少するのか、

原稿受付 2011年11月21日

1. 近畿大学大学院生物理工学研究科 電子システム情報工学専攻, 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930

2. 近畿大学生物理工学部 システム生命科学科, 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷 930

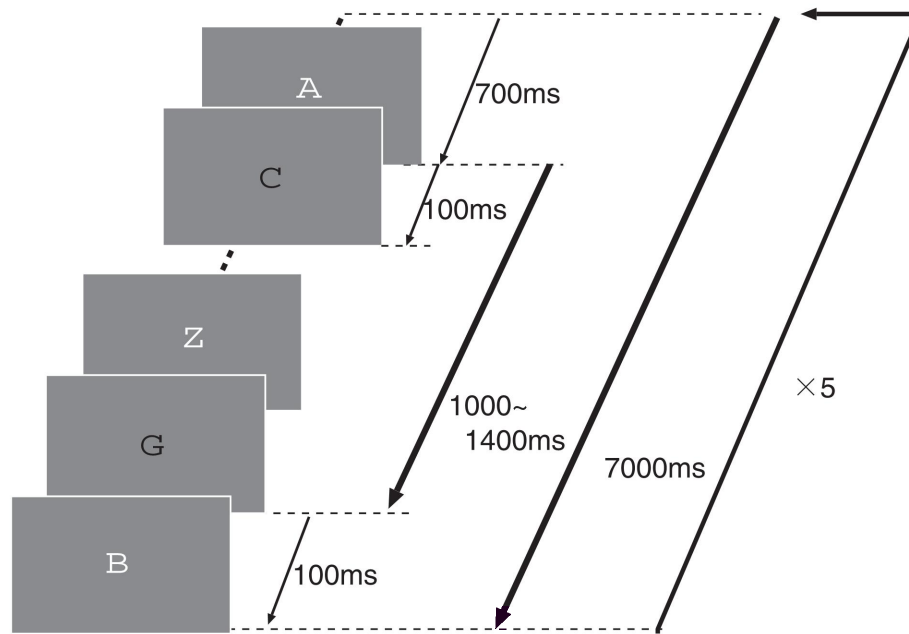


図 1: 実験 1 の概要

いずれの見解が妥当であるかは結論が得られていない。そこで本研究では、注意の集中によりマイクロサッカードの発生頻度が減少するとの仮説のもとに、注視を維持した状態で注意の集中度を制御する実験を行い、このときのマイクロサッカードの発生頻度について解析した。

## 2. 実験方法

### 2.1. 実験 1

本研究では、注視を維持したまま注意の集中度合いを統制するために、モニタ中央に連続的に表示される白色の英字を妨害刺激とし、その中から明るさの異なる英字を回答する RSVP (rapid serial visual presentation) 課題を被験者に課した。目標刺激には、妨害刺激と同サイズの英字を用い、妨害刺激とのコントラスト差により、課題の難易度を調整し、注意の集中度合いを統制した。目標刺激の明るさによって 3 種類の実験条件を設け、探索を課さない白色の Control 条件、黒色の High Contrast (HC) 条件、灰色の Low Contrast (LC) 条件とした。それぞれ「注意の集中を必要としない場合」、「ある程度の注意の集中を要する場合」、「十分な注意の集中が必要な場合」に相当する。

図 1 に実験 1 の概要を示す。1 試行の実験時間は 7000ms であり、この間に 100ms 毎に英字が提示された。このうち、目標刺激となる英字は、実験開始から 700ms 経過した後の 1000~1400ms の間に、ランダムなタイミングで 5 文字だけ提示された。被験者は、刺激呈示終了後に読み取れた全ての目標刺激を可能な限り正確に回答するよう教示され、回答終了と同時に正答数が口頭で伝えられた。ただし、正答数のカウントの際、目標刺激の提示順序については不問とした。また、被験者には、試行中はモニタ中央に提示される英字上を注視し続けるよう教示し、この時の眼球運動を計測した。

### 2.2. 実験 2

実験 1 では、HC 条件、LC 条件間で注意の集中度合いに変化が生じたか否かを確認することができない。そこで、注意のリソースが一定であるとの知見<sup>(7)</sup>に基づき、先述した RSVP 課題に加え、背景に提示された低

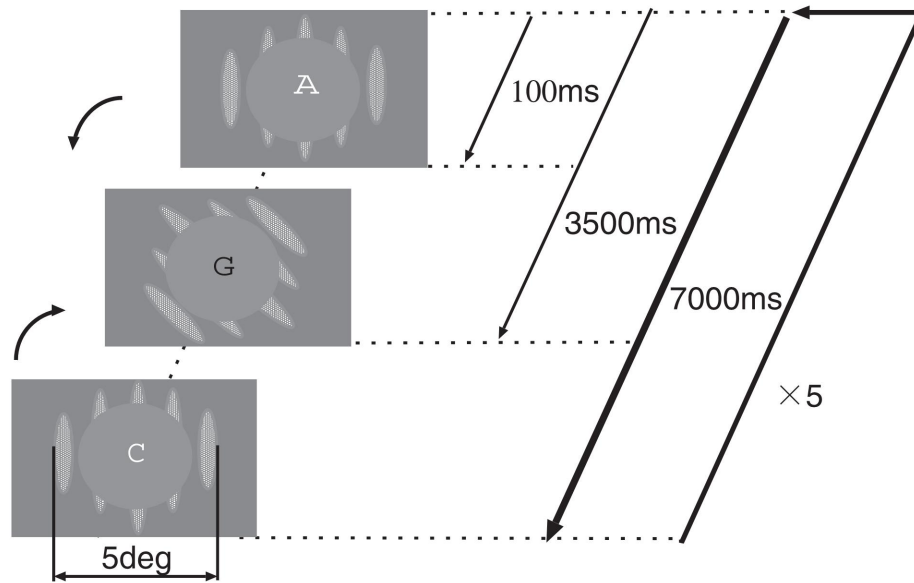


図 2: 実験 2 の概要



図 3: 実験 2 で用いた視覚刺激 (実験開始直後)



図 4: 実験 2 で用いた視覚刺激 (3500ms 後)

コントラストのガボールパッチの周辺部に生じる回転を検出させるダブルタスクを課した (図 2)。この際、被験者には目標刺激である英字の検出を優先するよう教示した。

図 2 中、背景に提示したガボールパッチの回転速度には、 $5.7 \text{ deg/s}$ 、 $8.6 \text{ deg/s}$  の 2 条件を設け、それぞれ Low Speed (LS) 条件、High Speed (HS) 条件とした。いずれの条件においても、ガボールパッチは左右いずれかの方向に 3500ms かけて回転し、最大角度 (それぞれ  $20 \text{ deg}$ 、 $30 \text{ deg}$ ) まで傾いた後、3500ms かけてもとの垂直状態へと復帰された。HS 条件、LS 条件のそれぞれにおいて、実験 1 と同様に目標刺激と妨害刺激の間のコントラスト差に応じて HC、LC の 2 条件を設けた。実験 2 で用いた視覚刺激の例を図 3 および図 4 に示す。図 3 は実験開始直後のガボールパッチが正立している状態、図 4 は 3500ms 後にガボールパッチの傾斜が最大となった状態を示す。ガボールパッチの傾き変化は、RSVP 課題を課さなければ、ほぼ完全に検出することが可能であった。

被験者へのフィードバックは、実験 1 と同様に目標刺激である英字の正答数について行った。これにより被験者に目標刺激の検出に重点を置いて課題を遂行させるよう配慮した。実験 2 では RSVP 課題の精度およびガボールパッチの検出率に基づいて注意が局所的に分布していたか否かを評価することを目的としており、眼球運動の計測は行っていない。

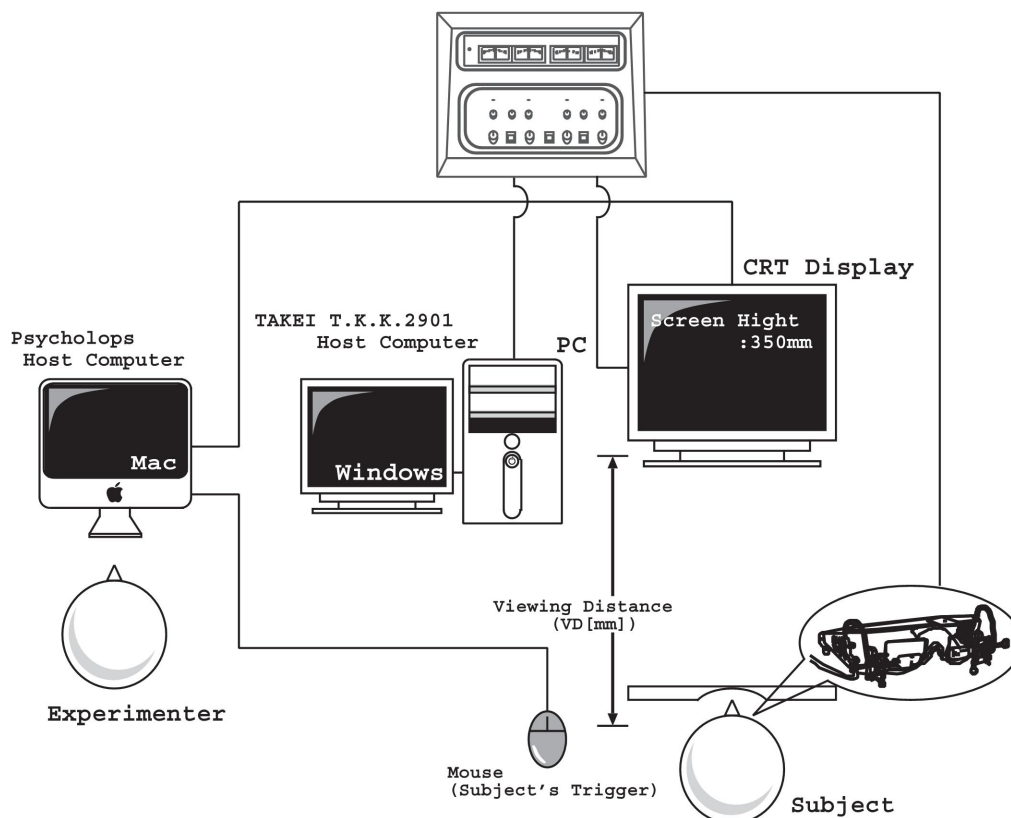


図 5: 実験システムの概要

### 3. 実験環境と解析方法

実験システムの概要を図 5 に示す。実験は、環境光等の影響を避けるために簡易暗室内で実施した。実験システムは、眼球運動測定装置と 2 台のパーソナルコンピュータを中心として構成され、一方のコンピュータによって眼球運動データの記録が行われ、もう一方のコンピュータによって 19 インチ CRT モニタ（ナナオ：FlexScanT766）上への視覚刺激の制御と、被験者からのレスポンスの取得を行った。モニタの視距離（図 5 中の VD）を 720 mm に設定し、視野角（図 5 中の VA）にして縦に 20deg，横に 30 deg までの範囲内で刺激の提示を可能とした。視覚刺激は、Apple 製 MacBook（MB466J）上で、Psychlops<sup>(8)</sup> を用いて 100 fps にて制御した。被験者の眼球運動の計測には、強膜反射法による測定装置（竹井機器工業：T.K.K.2901）を使用した。

被験者は、日常生活において視力矯正を必要としない 20 代の男性（BM, EA, SK, KS）4 名で、目標刺激が十分に読み取れる視力を有することを確認した。

眼球運動のデータには、まず 25 点のメディアンフィルタによりノイズ除去を行った後、式 (1) に示す低域微分フィルタ<sup>(9)</sup> を用いて 1 次微分信号を算出した。SR はサンプリングレート（1kHz），N はノイズ成分を抑えつつマイクロサッカードの動特性をよく保存できた数字として N=12 に設定した。

$$x_{vel}(t) = \frac{SR}{N(N+1)} \sum_{n=1}^N \{x(t+n) - x(t-n)\}, t \geq N \quad (1)$$

1 次微分信号が、5.0 deg/s の速度閾値を越えたものをマイクロサッカードとして抽出し、毎秒あたりの発生数を数え上げ、マイクロサッカード発生頻度を求めた。以上の解析手法によって検出されたマイクロサッカードの例を図 6 に示す。

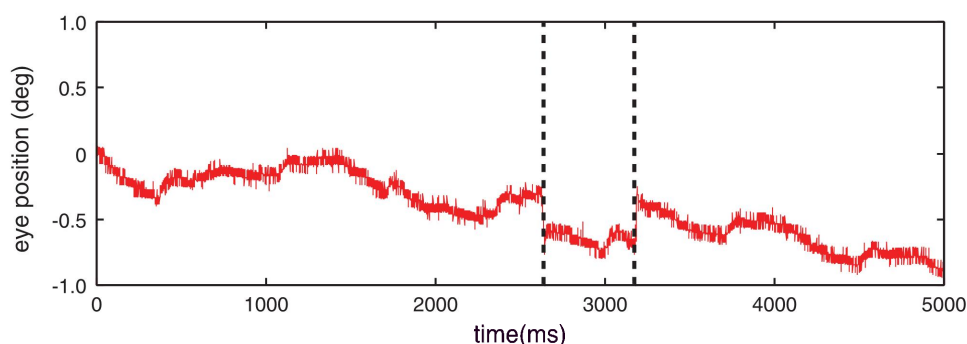


図 6: マイクロサッカード検出例

#### 4. 注意の集中度の評価

実験 1 および実験 2 の目標刺激とガボールパッチ回転方向の正答率を図 7 に示す。両実験における HC 条件および LC 条件の目標刺激の正答率をそれぞれ■ (HC Alphabet) と● (LC Alphabet) で示した。図中、横軸の No Gabor は実験 1 の結果であり、HS および LS は実験 2 の各条件での結果である。また、実験 2 におけるガボールパッチの回転方向の正答率について、HC 条件での結果を□ (HC Gabor) で、LC 条件での結果を○ (LC Gabor) で示した。

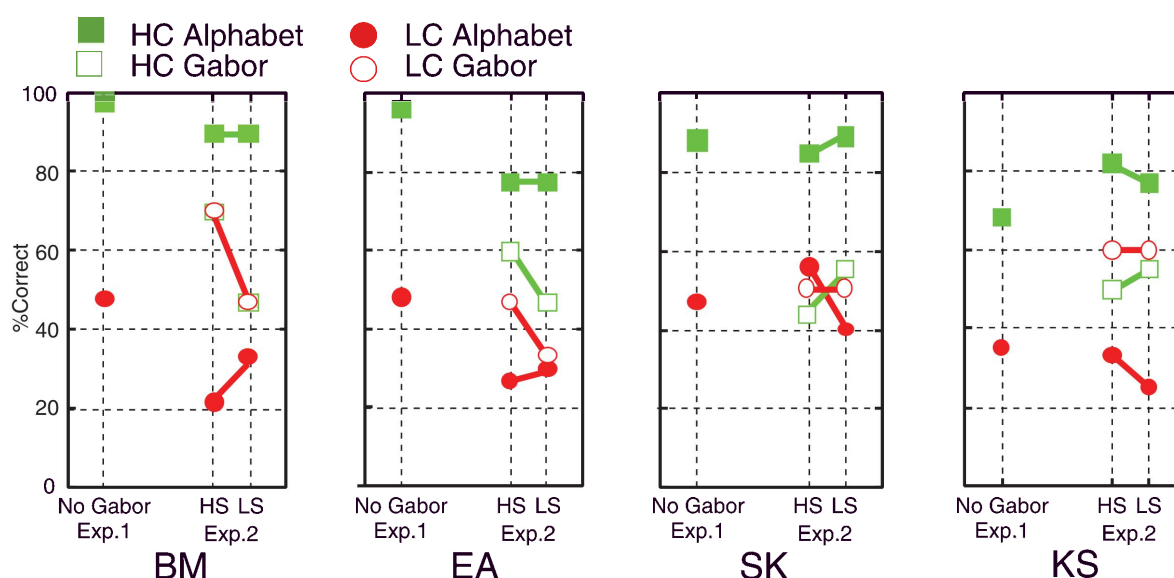


図 7: 目標刺激とガボールパッチ回転方向の正答率

被験者 BM, EA では、HC 条件、LC 条件共に、ガボールパッチ回転方向の正答率は、判別が容易であると考えられる HS 条件の方が LS 条件よりも高くなっている (HS □-LS □, HS ○-LS ○の比較)。このときの LC 条件における目標刺激の正答率を見ると、HS 条件より LS 条件の方が高い (HS ●-LS ●の比較)。このことは、ガボールパッチの判別が困難となる LS 条件において、注意のリソースがガボールパッチに奪われにくくなり、その分だけ目標刺激の検出に割り当てられたものと推察され、難易度の高い LC 条件に、その効果が顕著に現れたものと考えられる。

これに対し、被験者 SK, KS においては、ガボールパッチ回転方向の正答率は、HC 条件では HS 条件よりも LS 条件の方が高く (HS □-LS □の比較)、LC 条件では同程度である (HS ○-LS ○の比較)。また、目標刺激の正答率は、HS 条件の方が LS 条件よりも高い (HS ●-LS ●の比較)。これは HS 条件より LS 条件の方

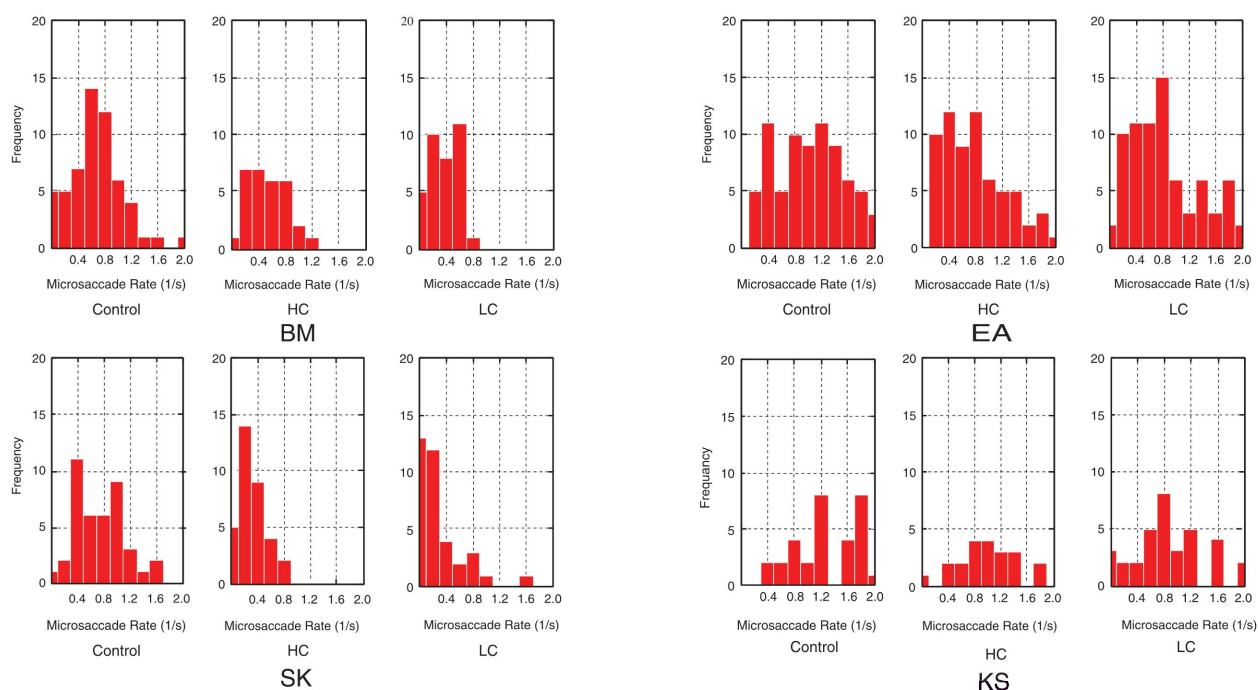


図 8: マイクロサッカド発生頻度ヒストグラム

がガボールパッチの判別が困難であることから、ガボールパッチの検出のために注意のリソースが奪われた結果、目標刺激の正答率が低下したものと考えることができる。

全ての被験者に共通して HC 条件, LC 条件の間には大きな差異が見られるとともに、目標刺激の正答率とガボールパッチの回転方向の正答率との間にトレードオフの関係が存在する。この傾向は、LC 条件においてより顕著であることから、目標刺激を正確に検出するには、LC 条件の方が HC 条件よりも注意の集中を要すると考えられる。

## 5. マイクロサッカド発生頻度の比較

図 8 に、各被験者の実験条件ごとのマイクロサッカド発生頻度をヒストグラムで示した。全ての被験者に共通して、Control 条件に比較して、HC 条件, LC 条件において分布のピークが原点側に偏る傾向が示された。被験者 BM と SK においては、LC 条件の方が HC 条件よりも強い偏りが生じている。

図 9 には、マイクロサッカド発生頻度について、実験条件ごとに中央値を求めた結果を示す。被験者 BM を除く 3 名の被験者では、Control 条件, HC 条件, LC 条件間の母代表値に差がないことが棄却された (Kruskal-Wallis test:  $p < 0.01$ )。これら 3 名の被験者においては、Control 条件と LC 条件の間で有意差が見られ (Wilcoxon test:  $p < 0.01$ )、Control 条件と HC 条件の間でも有意差がみられた ( $p < 0.01$ )。被験者 BM では、Control 条件と LC 条件の間で有意差が見られ ( $p < 0.01$ )、HC 条件と LC 条件の間で有意差が認められた ( $p < 0.05$ )。被験者 BM は、予備実験の段階から繰り返し実験に参加した well-trained な被験者であることから、他の被験者とは異なる傾向を示したものと思われる。

## 6. 結論

本研究では、注意の集中により、マイクロサッカドの発生頻度が減少するとの仮定のもとに注視を維持した状態で注意の集中度を制御する実験を行い、このときのマイクロサッカド発生頻度について解析を行った。



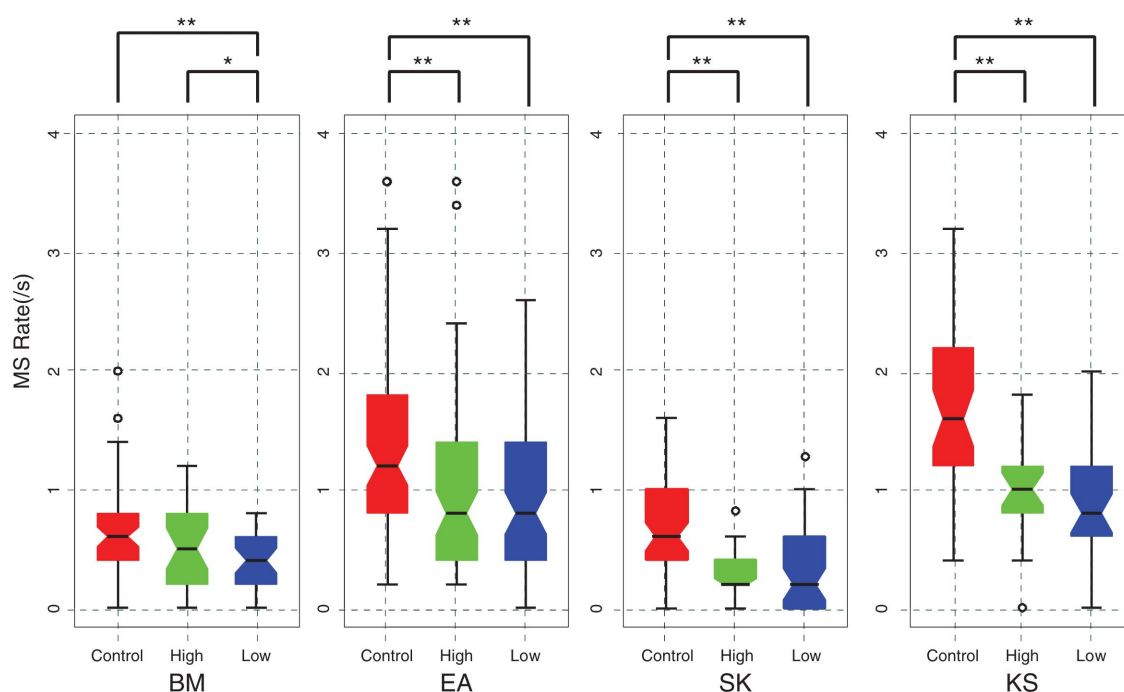


図 9: マイクロサッカード平均発生頻度の比較

実験課題は、モニタ中央に連続的に表示される英字を妨害刺激とし、ランダムなタイミングで表示される黒い英字を目標刺激として読み取るものであり、目標刺激と妨害刺激とのコントラスト差が高いとき (HC)、低いとき (LC) および文字の読み取り無し (Control) の3条件で注意の集中度をコントロールした。注意の集中度合いを検証するため、文字の読み取りと同時に、周辺視野に配置した低い空間周波数のガボールパッチを一定速度で左右いずれかに回転運動させ、回転方向の検出を課した。

実験の結果、LC条件においてマイクロサッカードの発生が抑制される傾向が示され、ガボールパッチの検出率から、この条件において注意がより集中されていたことが確認された。また、一部の被験者には、注意がより局所的に集中されるほど、マイクロサッカードの発生が抑制される傾向が見られた。これらのことから、マイクロサッカードの発生頻度は、注意の集中に伴って抑制されることが示唆される。

注意の移動には、まず始めに集中されていた注意を一旦開放する必要があるとされる<sup>(10)</sup>。本研究の結果を鑑みると、注意の移動に伴ってマイクロサッカード発生頻度が増加するとの報告は<sup>(3)~(5)</sup>、注意の集中により抑制されていたマイクロサッカードが、注意の開放と同時に抑制から脱し、その発生頻度が増加に転じていたものと考えることができる。

**参考文献**

- (1) Martinez-Conde S., Macknik S.L., Hubel D.H. (2004) The role of fixational eye movements in visual perception. *Nature Rev. Neurosci.*, 5, 229–240
- (2) Rolfs M. (2009) Microsaccades: small steps on a long way, *Vision Res.*, 49,2415–2441
- (3) Laubrock J.,Engbert R.,Kliegl R. (2005) Microsaccade dynamics during covert attention, *Vision Res.*,45,721–730
- (4) Kohama T.,Usui S. (2002) Attentional effects on microsaccadic eye movements, *Current Psychol. Cogn.*, 21,377–395
- (5) Hafed Z.M.,Clark J.J. (2002) Microsaccades as an overt measure of covert attention shifts, *Vision Res.*, 42, 2533–2545
- (6) Engbert R.,Kliegl R. (2003) Microsaccade uncover the orientation of covert attention, *Vision Res.*, 43, 1035–1045
- (7) Palmer J. (1990) Attention limits on the perception and memory of visual information. *J.Exp.Psychol.:Human Percept. & Perform.*,16,332–350
- (8) 細川研知, 丸谷 和史, 佐藤隆夫 (2009) Psychlops: C 言語による汎用的な視覚刺激提示ライブラリ, *日本視覚学会誌*, 21, 165–172
- (9) Usui S., Amidor I. (1982) Digital low-pass differentiation for biological signal processing *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, MBE-29, 10, 686–693
- (10) Posner M.I., Petersen S.E. (1990) The attention system of the human brain, *Ann. Rev. Neurosci.*, 13, 25–42



## Inhibition of microsaccade rate caused by focus of visual attention

Sho Endo<sup>1</sup> and Takeshi Kohama<sup>2</sup>

Recent studies show that the mechanism responsible for the occurrence of microsaccades, which are small involuntary shifts in the eye-gaze position, is related to the visual attention system. Some of these studies show that the microsaccade rate increases with attention shift. In contrast, the other studies indicate that the occurrence of microsaccades is inhibited when visual attention is focused around a fixed target. It has not yet been established as to which of these conclusions is correct. In this study, we hypothesized that the microsaccade rate decreases with focal attention and carried out experiments to control the focus of subjects' attention when they were maintaining their fixation. Using a rapid serial visual presentation (RSVP) paradigm, we displayed alphabets at the center of a CRT display. Subjects were instructed to detect randomly displayed blackish letters from among the gray letters on the screen. The contrast between the target and distractor letters was adjusted to either high contrast (HC task) or low contrast (LC task) in order to control the degree of focal attention. As a control, no target letters were displayed (Control task). While subjects were pursuing these tasks, their fixation eye movements were measured. To verify the degree of focal attention, we tested the subjects on a rotation direction detection task; this task involved the detection of a low-spatial-frequency Gabor patch that rotated clockwise or counterclockwise at a uniform speed in the subject's peripheral vision. The results indicate that microsaccade rate was more inhibited in the LC tasks. The results of the Gabor-patch rotation detection show that the subjects' visual attention was more intense around the fovea in the LC tasks than in the HC tasks. These results suggest that the microsaccade rate varies with the degree of focal attention around the foveal region.

---

1. Graduate School of Biology-Oriented Science and Technology, Kinki University, Kinokawa, Wakayama 649-6493, Japan

2. Department of Computational Systems Biology, Kinki University, Kinokawa, Wakayama 649-6493, Japan