



スポーツパフォーマンスに寄与する 卓球選手の眼球運動特性

Eye movement characteristics of table tennis players contributing to sports performance

中里りく¹⁾, 七五三木聡^{1, 2)}

Riku NAKAZATO and Satoshi SIMEGI

1) 大阪大学大学院生命機能研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-1)

2) 大阪大学全学推進機構 (〒560-0043 大阪府豊中市待兼町 1-16)

概要：卓球などの球技では眼球運動の良否がパフォーマンスに関与している可能性がある。本研究では卓球競技者の眼球運動特性を明らかにするため、仮想空間内の卓球台上を移動するボールを視線で追視する課題を構築し、卓球競技者群と非競技者群の比較を行った。両群とも主にサッカードでボールを追視しており、サッカード終了時の空間誤差は競技群が非競技群より有意に小さかった。競技者はサッカードする能力に優れていると考えられる。

キーワード：卓球 眼球運動 サッカード

1. 背景

卓球などの球技スポーツ場面では、眼球運動によってボールを視野の中心で捉え、空間解像度の高い情報を得る事が重要である。卓球のようなボールの速度が速いスポーツでは、サッカードと呼ばれる急速な眼球運動を用いてボールを捕捉する必要があり、卓球選手の優れたスポーツパフォーマンスには、優れたサッカード眼球運動能力が寄与している可能性がある。

スポーツ選手と眼球運動能力の関係性を調べた先行研究は複数あり、卓球競技者は非競技者に比べて視標が出現してからサッカードが開始されるまでの時間(サッカード潜時)が短いことを報告している研究がある一方で(Kunita & Fujiwara, 2022)、ラケットスポーツ競技者(バドミントンやスカッシュなど)と非競技者でサッカード潜時には差がないことを報告している研究もあり(Bobu RJ et al., 2001)、一致した見解は得られていない。

また、これまで行われてきたスポーツ選手の眼球運動能力の研究には、二つの問題点があげられる。一つ目は、モニター上に呈示された視標を視線で追視する実験課題を用いている点であり、奥行方向の情報の無い二次元空間での課題であるため、卓球実場面からかけ離れている。特に、卓球実場面では、ボールは奥から手前へと飛んでくる奥行方向の運動を行うが、モニター上の課題においては、奥行方向の運動に対する追視を評価することはできていない。二つ目は、眼球運動の空間的精度についての評価が行われて

いない点である。これまでの研究では主に視標が周辺視野に呈示されてからサッカードが行われるまでのサッカード潜時に焦点があてられてきたが、正確な視覚情報を得るためには、サッカードにより視線をボールへ正確に到達させる必要がある。このように、眼球運動の質を評価するためには、眼球運動の空間的精度に着目することが必要不可欠である。

そこで、上記の問題を解決するために、眼球運動の計測できる Virtual Reality (VR) デバイスを用いることで、奥行方向に動く運動視標を用いた視標追視課題の構築及びサッカード眼球運動の空間的精度の評価を可能にした。

本研究では、実際の卓球シーンを模した仮想環境下での「視線によるボール追視課題」を実施し、卓球競技者(TT)と非競技者(Control)のボール追視能力の違いおよびその特性を明らかにすることを目的とした。

2. 方法

2.1 実験 1 ボール場面を模したボール追視課題

2.1.1 実験参加者

大学卓球部に所属し、卓球競技歴が3年以上の学生(男性6名・女性4名, 21.0±1.18歳)をTTとし、卓球部(クラブ)とその他打ち返すスポーツ(テニス, 野球, バレー

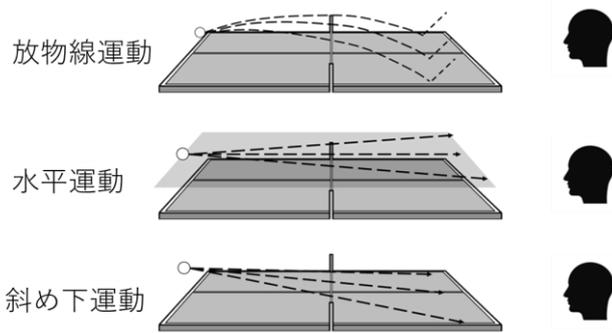


図1 3種類のボール軌道

など)の部活に所属した経験のない学生(男性5名・女性5名, 23.6 ± 3.74 歳)を Control とした。すべての実験参加者は両眼の視力または矯正視力が 1.0° 以上だった。

2.1.2 実験課題

Unity を用いて VR 空間に視覚刺激提示した。VR 空間では、参加者の目の前に卓球台(奥行き×幅×地面からの高さ, $2.76\text{m} \times 1.575\text{m} \times 0.76\text{m}$)が設置され、参加者と卓球台の前端との距離は 1メートルだった。卓球台の遠端から 1メートル離れたところに黒い壁が設置された。

実験参加者は、あご台に頭部を固定された状態で、卓球台の奥から手前に向かって移動するボールをできるだけ視線で追うように求めた。

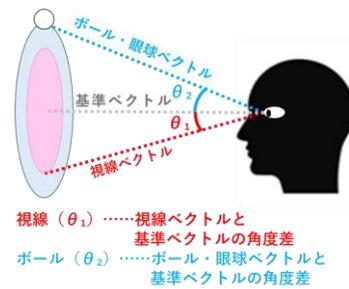
実際の卓球場面におけるボール速度 (6.0m/s , 到達まで約 0.4 秒)を 1.0 とし, $0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$ の 6 段階の速度を用意した。6つのボール速度, 3つのコース(右, 中央, 左), 3つの軌道(現実の卓球ボールの動きを再現した放物線運動, 水平方向および斜め下方向への等速直線運動, 図1)の条件を組み合わせた合計 54 パターンのボールがランダムな順番で提示した。各パターンにおいて 20 回の試行が行われた。

2.1.3 データ解析

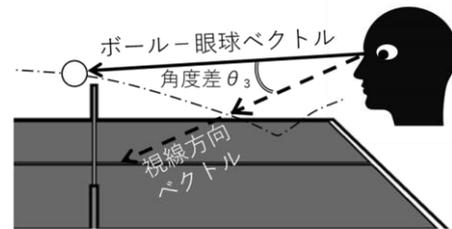
すべての試行におけるボールの位置, 眼球の位置, 視線方向が座標位置と単位ベクトルとして記録された。

視線方向を定義するために, 眼球から前方へと水平に伸びるベクトルを基準ベクトルとし, 視線方向ベクトルと基準ベクトルの間を θ_1 と定義した。同様に, ボールの位置を定義するために, ボールと眼球を結んだボール・眼球ベクトルと基準ベクトルの間を θ_2 と定義した。また, 視線がどの程度正確にボールに向けられているかを定量評価するために, 各時刻におけるボール・眼球ベクトルと視線方向ベクトルがなす角度 θ_3 を計算し, 視線方向の空間精度とした(図2)。

θ_1 を微分して眼球運動の回転速度を求め, θ_1 の速度が 30° /秒以上になった時刻をサックード開始時刻とした。ただし, θ_1 の振幅が 2° 以下, または継続時間が 20ms 以下の場合はサックードから除外した(Matsuo et al., 2015)。サックードの終端における角度 θ_3 の値をサックード誤差



視線 (θ_1) ……視線ベクトルと基準ベクトルの角度差
ボール (θ_2) ……ボール・眼球ベクトルと基準ベクトルの角度差



サックード誤差……サックード終了時点での θ_3

図2 ベクトルを用いたデータ解

として, サックードの空間精度の指標として使用した。サックード誤差が小さいほど, ボールに対して正確なサックードを行ったことになる。

群間 (TT 群, Control 群) とボール速度 ($0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.2$) を因子として, サックードの発生頻度, 発現時間, 誤差を二元配置分散分析 (2 Way ANOVA) により統計的に分析した。相互作用が有意な場合は, ポンフェローニの多重比較によって各速度条件に対して事後テストが実行された。すべての分析の有意水準は 5% 未満でした。すべてのデータは平均±標準誤差として表された。

2.2 実験2 静止視標追視課題

2.2.1 実験参加者

大学卓球部に所属し, 卓球競技歴が三年以上の学生 (男性9名・女性1名, 20.7 ± 2.00 歳) を TT とし, 卓球部 (クラブ) とその他打ち返すスポーツ (テニス, 野球, バレーなど) の部活に所属した経験のない学生 (男性8名・女性2名, 21.4 ± 3.10 歳) を Control とした。すべての実験参加者は両眼の視力または矯正視力が 1.0° 以上だった。

2.2.2 実験課題

実験1と同様の卓球台と壁を備えた VR 空間内で視覚刺激を提示した。実験1と同様に, 参加者はあご台に頭を固定された状態で, ランダムな位置の提示されるボールを視線で追うように求められた。この課題では, 静止したボールが卓球台の上約 30cm のランダムな位置に提示された。ボールは 3 秒間提示されると消滅し, 同時に次のボールがランダムな位置に提示される。これを 30 試行行った。

2.2.3 データ解析

実験1と同様に, サックード後のボール・眼球ベクトル

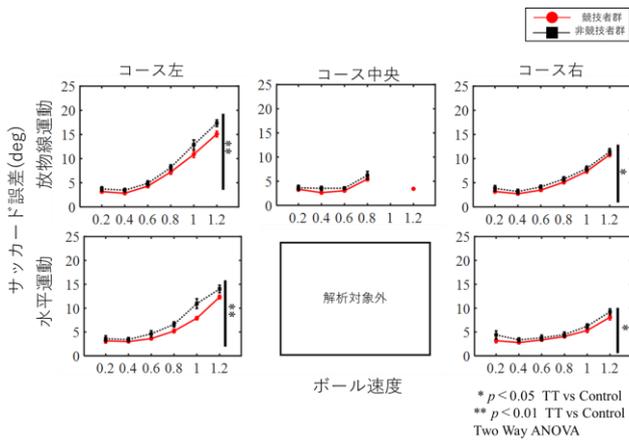


図3 実験1 サッカーボール誤差

と視線方向ベクトルがなす角度 θ_3 を計算し、サッカーボールの空間精度とした。

TT 群と Control 群の間でサッカーボール誤差を一元配置分散分析により比較した。有意水準はすべてのデータについて 5% 未満に設定された。すべてのデータは平均値 ± 標準誤差として表された。

2.3 実験3 tDCSによるMT野介入実験

2.3.1 実験参加者

大阪大学に所属する学生3名(18歳男性, 20歳男性, 23歳男性)が実験に参加した。すべての実験参加者は両眼の視力または矯正視力が1.0°以上だった。

2.3.2 実験課題

実験1と同様の卓球台と壁を備えたVR空間内で視覚刺激を提示した。

実験1で用いた速度のうち、0.6, 0.8, 1.0の3つのボール速度、2つのコース(右, 左)、3つの軌道の条件を組み合わせた合計18パターンのボールがランダムな順番で呈示した。各パターンにおいて15回の試行を行う計270試行を1ブロックとし、preとして1ブロック、MT野に対するtDCS介入を行うduringとして1ブロック、postとして1ブロックを行った。tDCS介入は陽極電極を、10-20法において左MT野とされているP6, P8, PO8をカバーするように設置した。また、介入ブロックでは、実際にtDCS介入を行うstimulate条件と、電気刺激の感覚を伴いながらも実際には皮質に電流が到達しないsham条件を、それぞれ別日に行った。

2.3.3 データ解析

実験1と同様に、サッカーボール後のボール・眼球ベクトルと視線方向ベクトルがなす角度 θ_3 を計算し、サッカーボールの空間精度とした。またサッカーボール誤差の変化率として、(during-pre)/preまたは(post-pre)/preを計算した。

3. 結果と考察

3.1 実験1 卓球場面を模したボール追視課題

実験1について、サッカーボール誤差を群間で比較したところ、放物線運動条件、水平運動条件ともに、左右のコース

においてTT群のサッカーボール誤差はControl群より有意に小さな値を示した(図3)。

卓球競技者が放物線運動の軌道に対して正確なサッカーボールができる理由として、二つの可能性が考えられる。一つ目は、卓球競技者は普段から放物線運動を行うボールを目にしているため、放物線運動に対する学習が起きており、記憶情報に基づいて正確なサッカーボールができる可能性であり、二つ目の可能性は、網膜に映った視覚情報に基づいて、サッカーボールを行うことができる可能性である。しかし今回の実験結果からは、卓球競技者は競技中に目にすることができない水平運動に対しても正確なサッカーボールができたことから、視覚情報に基づいたサッカーボール捕捉能力に優れていると考えることができる。

動く指標をサッカーボールで捕捉するためには、以下の二つの能力が寄与してくる。①視覚情報を元に到達地点の予測する能力(サッカーボールする位置を決める)、そして②その場所に向かってサッカーボールを行う能力(サッカーボールの制御)である。

そこで、卓球競技者がサッカーボールの運動制御能力に優れている可能性を明らかにするために、実験2の静止視標追視課題を行った。

3.2 実験2 静止視標追視課題

実験2について、サッカーボール誤差を群間で比較したところ、TT群とControl群の間に有意な差は見られなかった(図4)。このことから、卓球競技者と非競技者の間にサッカーボールの運動制御能力に差がなく、卓球競技者は到達地点の予測能力に優れている可能性が示唆された。

実験1のボール追視課題においては卓球競技群と非競技群にサッカーボール誤差の差が見られ、実験2では差が見られませんが、実験1と実験2の違いは、視標が運動を行っているかないかの違いである。そのため、卓球競技者は、ボールの運動情報を処理・活用し、ボールの将来

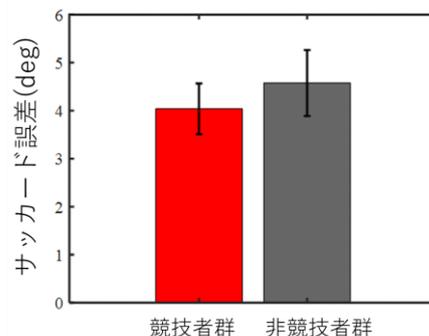


図4 実験2 サッカーボール誤差

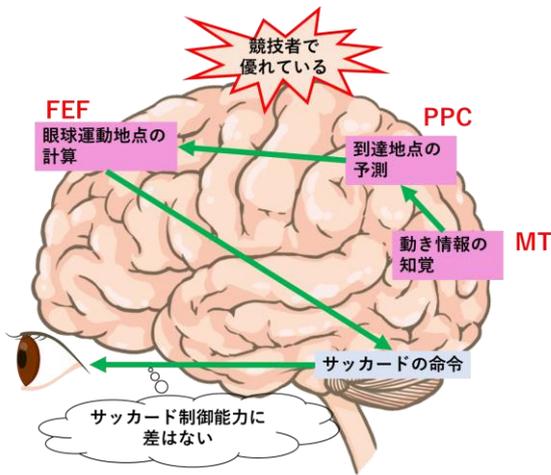


図5 サッカードの位置決定に寄与する領域

の到達地点を予測してサッカード位置を決定する能力に優れている可能性が考えられる。

このボールの運動情報を処理・活用し、到達地点を予測する能力に寄与していると考えられる脳領域として、物体の動きの知覚に関与しているMT野、物体の動きから到達地点を予測しコードしていると考えられる後頭頂皮質(PPC)、眼球運動の到達地点の決定を行っている前頭眼野(FEF)である(図5)。

そこでまず、MT野に焦点を当て、動き情報の知覚がサッカードの空間精度にどのように関与しているのかを調べるために、tDCSによるMT野への介入実験を行った。

3.3 実験3 tDCSによるMT野介入実験

tDCSで陽極刺激を行うとその部位での皮質興奮性が向上するため、MT野に陽極刺激を行うことで、動き情報を知覚する能力が向上し、動き情報に基づいたサッカード捕捉の能力も向上する可能性が考えられる。そこで実験3として、tDCS介入前後でサッカード誤差を比較する実験を行った。

また、MT野は左MT野が右視野、右MT野が右視野と左視野の両方の動き刺激に反応することが知られている。そのため、本研究においては左MT野に陽極刺激を行い、その効果がコース右(右視野)へのボールに対するサッカード誤差に現れることを想定して実験を行った。

その結果、サッカード誤差をpre-during-postで比較すると、stimulate条件のコース右において、duringとpostにおけるサッカード誤差がpreよりも低下していることが分かった。一方、コース左やコース右のsham条件においては、

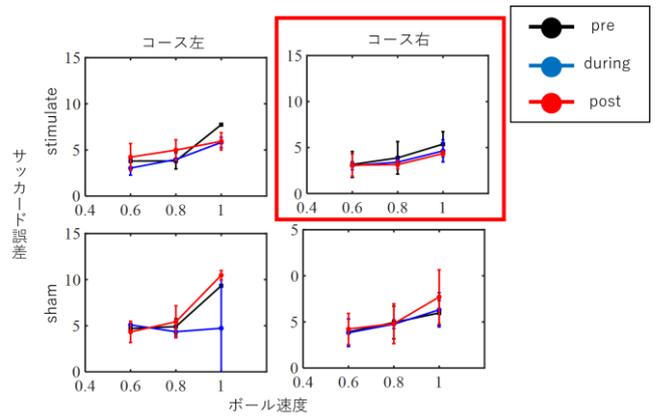


図6 実験3 サッカード誤差

このようなサッカード誤差の低下は見られなかった。

これらの結果から、サッカードで動く物体を捕捉するためには、MT野で取得された情報が活用されており、競技者の高いサッカード捕捉能力は、MT野の情報処理能力の高低が寄与している可能性が示唆された。

4. 結論

卓球競技者は動く指標をサッカードで正確に捕捉する能力に優れており、その能力には動き情報を知覚・処理し到達地点を予測する能力が寄与していると考えられる。また、その予測能力にはMT野における動き情報の知覚に関与しているため、MT野を鍛えるトレーニングを行うことで、卓球競技者の競技パフォーマンスを上げられる可能性が示唆された。

参考文献

- [1] Kiyota K and Fujiwara K (2022). Influence of sports experience on distribution of pro-saccade reaction time under gap condition. *Journal of Physiological Anthropology volume 41*, Article number: 4
- [2] Babu, R.J., Lillakas, L., and Irving, E.L. (2005). Dynamics of saccadic adaptation: differences between athletes and nonathletes. *Optom Vis Sci* 2005; 82: 1060-1065.
- [3] Matuo, Y., Watanabe, M., Taniike, M., Kobayashi, S., Tachibana, M., Kobayashi, Y., and Kitamura, Yuri. (2015). Effect Abnormalities during a Visually Guided Pro-Saccade Task in Children with Attention Deficit Hyperactivity Disorder. *PLOS ONE*, doi.org/10.1371/journal.pone.0125573