



Title	球技競技者における運動視の特性・機能的役割・神経機構
Author(s)	呉屋, 良真
Citation	大阪大学, 2020, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/76639
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士論文

球技競技者における運動視の特性・
機能的役割・神経機構

**Characteristics, functional role,
and neural mechanism of motion vision
in fast ball game athletes**

呉屋 良真

大阪大学大学院 生命機能研究科 生命機能専攻
全学教育推進機構 スポーツ脳情報科学研究室

主査：七五三木 聡 教授

2020 年 3 月

Abstract

Introduction: Visual function is critical for fast ball game athletes as a determinant of the sport performance, and the visual system especially needs to process the information concerning the motion of a ball and opponents accurately and quickly in a temporal constraint, making the subsequent motor actions. The motion vision is based on a signal processing of a dorsal visual pathway in the brain, independently on a ventral pathway for object vision. Therefore, the ability of the motion vision is expected to contribute to the ball-game performance, however, it is still unclear 1) whether fast ball game athletes have superior motion vision comparing to nonathletes, 2) whether the motion vision contributes to the visuomotor performance, and 3) whether event-related potential (ERP) recorded from higher order visual area MT which is a center of visual motion analysis represents stimulus motion coherence and task performance. Therefore, I examined these points using the motion direction discrimination (MDD) task based on random-dot kinematogram.

Methods: College table tennis athletes and nonathletic college students (nonathlete) participated in this study. [MDD task] A fixation point (FP) was presented at the center of the LC display, and randomly moving dots were displayed in four circular apertures (diameter 8°) located diagonally from FP. One among them contained target dots which moved to the same direction at a certain percentage (motion coherence), and participants were asked to report the direction of target dots. The inverse of the minimum discriminable motion coherence was calculated as MCS. MCS measurements were conducted with/without background noise of randomly moving dots throughout the display and at three distance of apertures from the FP, 8° (Near), 12° (Middle), 16° (Far). [CVM task] Visuomotor performance was measured using the consecutive visuomotor (CVM) task, in which target (small Gabor patch) moved horizontally in a linear uniform motion from right to left of LC display one after another at a random Y-axis position. Participants were instructed to hit target by a cursor which moved in vertical axis along the left side of the display relying on the manual prehension force given to force-sensor. Seven speed conditions of target from slow to fast were tested and visuomotor performance was assessed as hit rate. [EEG] EEG was recorded from area hMT/MST during MDD task.

Results and discussions: Athletes showed a superiority in MCS only at middle target location (perifoveal region) comparing to nonathletes, and the difference was more remarkable in background noise condition. It suggests that table tennis athletes have superior ability to extract motion signal from noisy background in a dorsal-pathway-dominant peripheral visual field and daily practice of table tennis improves motion vision in a visual-field-dependent manner. Next, I examined the relationship between MCS and visuomotor performance using the intra-individual variability of the MCS. Both MDD and CVM tasks were conducted 10 times on different days, finding a strong correlation between MCS and CVM performance. Thus, MCS is suggested to contribute to visuomotor performance. Finally, N2 waves of ERP in hMT/MST was found in some participants to reflect not only motion

coherence of moving dots but also success/failure of task.

In conclusion, motion vision is superior in fast ball game athletes, contributes to the visuomotor performance, and is underpinned on hMT/MST activity, suggesting importance of improvement of motion vision ability for fast ball game athletes.

目次

第1章 研究背景	5
1.1. 視覚機能とその評価方法	5
1.1.1. 競技中の視覚情報処理	5
1.1.2. 二つの視覚情報処理経路	6
1.1.3. 球技競技者の視機能	6
1.2. 運動方向弁別課題の構築	7
1.3. 目的	7
第2章 球技競技者と球技未経験者の運動視能	8
2.1. 背景と目的	8
2.2. 方法	8
2.2.1. 実験参加者	8
2.2.2. 実験装置	8
2.2.3. 視覚刺激	10
2.2.4. 階段法による運動方向弁別課題と実験手順	12
2.2.5. 計測と解析	15
2.2.6. 統計処理	15
2.3. 結果	16
2.3.1. 運動コヒーレンス感度	16
2.4. 考察	20
2.4.1. 背景ノイズが運動視能に与える影響	20
2.4.2. 視覚刺激の空間的位置と運動視能の関係	22
2.4.3. 既存の視機能計測との相違点	22
第3章 視覚運動パフォーマンスへの運動視能の寄与	24
3.1. 背景と目的	24
3.2. 方法	24
3.2.1. 実験参加者	24
3.2.2. 実験装置	24
3.2.3. 実験のデザイン	24
3.2.4. 視覚刺激	25
3.2.5. 実験手順	27
3.2.6. 計測と解析	29

3.2.7. 統計処理.....	29
3.3. 結果.....	30
3.3.1. 運動方向弁別課題の弁別反応時間.....	30
3.3.2. 視覚運動課題のヒット率.....	31
3.3.3. 運動方向弁別課題の弁別反応時間と視覚運動課題のヒット率の相関関係.....	32
3.4. 考察.....	34
3.4.1. 運動視能と視覚運動パフォーマンスの関係.....	34
第4章 運動方向弁別課題中の脳活動と課題成否.....	36
4.1. 背景と目的.....	36
4.1.1. 脳波研究における事象関連電位（ERP）について.....	36
4.1.2. Motion onset に関する ERP 研究.....	36
4.2. 方法.....	38
4.2.1. 実験参加者.....	38
4.2.2. 実験装置.....	38
4.2.3. 視覚刺激のデザイン.....	39
4.2.4. 視覚刺激.....	39
4.2.5. 恒常法による運動方向弁別課題と実験手順.....	41
4.2.6. 計測と解析.....	42
4.2.7. 統計処理.....	42
4.3. 結果.....	43
4.3.1. 運動方向弁別能（正答率と反応時間）.....	43
4.3.2. 運動方向弁別課題遂行中の mVEPs.....	44
4.4. 考察.....	46
4.4.1. mVEPs の特性.....	46
第5章 総括.....	48
謝辞.....	49
参考文献.....	50
業績.....	53

第1章 研究背景

視覚情報に基づく身体運動を視覚運動と呼び、球技競技場面で実行される打球や返球、捕球などの身体運動はほとんど視覚運動である。視覚運動の発現には、眼から得られた視覚情報を、脳内で「視覚情報処理」、「視覚－運動変換処理」、「運動情報処理」などの多くの情報処理プロセスを必要とする。これらの一連の情報処理の最終的な出力が運動であるため、筋収縮（運動）のための運動指令形成に関わる運動情報処理だけではなく、視覚情報処理を含むすべてのプロセスの脳情報処理能力が視覚運動パフォーマンスの良否を左右することが考えられる。

上記を踏まえると、脳情報処理のなかでも、特に、視覚情報処理能力を改善することで視覚運動パフォーマンスの向上することが期待されるが、パフォーマンスと直接関わる視機能や、パフォーマンスを向上させる視機能トレーニングの報告はほとんどないのが現状である。この原因として、球技競技者が実際の競技中に使っている視覚情報が何であるか、脳ではどのように情報が処理されているのか、これらの理解が進んでいないためであると考えられる。

そこで以下では、眼から得られた視覚情報が、脳内でどのように処理されているのかを説明し、これまでの球技競技者の視機能に関する先行研究を概観する中で、脳情報処理のうち、スポーツパフォーマンスに寄与する視覚情報処理の観点から整理し、残された問題とその原因・解決策を明確にするとともに、それらを踏まえた本研究の目的を述べる。

1.1. 視覚機能とその評価方法

1.1.1. 競技中の視覚情報処理

私たちは競技中、眼から様々な情報を得ているが、パフォーマンスに貢献する視覚情報は競技種目で異なっている。アーチェリーなどの動かない的が視標となる競技の場合では、矢が的の中心に命中するように狙う精度が重要である。この精度を高めるためには、弓の持ち手に取り付けた照準器（スコープ）の中央に的の中心が来るように合わせる必要がある。この形（形態視情報）がパフォーマンスに大きく関わる視覚情報となる。

一方で、卓球やバドミントンなどの球技競技では、ボールや相手選手などの動きに応じたプレーが求められており、打球・返球場面においてはボールやシャトルといった視標の動く方向・速度（運動視情報）などの視覚情報をもとに、“どのように視標が動くのか”を予測し、“どのように身体運動を行うか”についての運動指令が生成される。このとき、ボールの質感や印字されている文字などの形態視情報はパフォーマンスにほとんど寄与しない。

上述した視覚情報は、どのような競技にも存在しており、脳内での処理が常に行われているが、その利用のされ方は、実行しようとするプレーによって大きく違っている。

1.1.2. 二つの視覚情報処理経路

眼から得られた視覚情報は、脳内で 2 つの並列した経路で処理されおり、物体の形や色といった特徴・詳細を処理する腹側視覚経路（形態視経路）と、物体の動きの方向・速度を処理する背側視覚経路（運動視経路）から成っている(Goodale and Milner, 1992; Milner, 1997)。形態視経路は形・色・模様などの視覚属性の情報を処理することで、物体の詳細な知覚イメージを形成し、その認知に寄与する（物体・形態視）。すなわち、形態視は空間分解能が高い。アーチェリーで必要な視覚情報はこの経路で処理される。

一方、運動視経路は、形態視と異なり色選択性はなく、時間分解能が高く、速く動く視覚刺激に対して一過性に反応し、情報伝達速度も早いため、動きや変化のタイミングを検出するのに適している。このため、球技競技のスポーツパフォーマンスに大きく寄与している視覚情報処理経路は運動視経路であると考えられる。したがって、各種スポーツにおけるパフォーマンスと視機能の関係を調べるためには、各経路の視機能評価が不可欠であり、その実現により、各競技におけるパフォーマンスの個人差や個人内の日間変動の原因としての視機能の役割に迫ることが可能になる。

1.1.3. 球技競技者の視機能

球技競技者は、静止視力やコントラスト感度、立体視などの様々な視機能が非競技者に比べて優れていることが報告されている(Hoffman, 1984; Hunfalvay, 2017; Sillero, 2007)。また、動く視標に対する視機能も動体視力として計測され、球技競技者の優位性が多く報告されている(Ishigaki, 1993; Palidis et al., 2017; Rouse, 1988; Zimmerman et al., 2011)。これらの計測には、一般的な視力検査で用いられるランドルト環(“C”字様)の切れ目(gap)の位置を弁別させる方法が多く、このランドルト環を横方向(左から右、あるいは右から左)に高速移動させ、その速度を上昇させることで空間分解能の限界を評価するものである。この動体視力は、眼球運動の良否を反映するとも言われている(Uchida et al., 2013; Uchida et al., 2012)。また、空間分解能は周辺視野と比べて中心視野で高いため、眼球運動をすることで動く視標を中心視野で捉えることができたかどうか動体視力を左右することが考えられる。

以上のことから、これまで実施されてきた視機能計測は、視標は動いているものの、物体の形やパターンがより詳細に見えているか、という形態視の観点から評価されてきたと考えられる。また、クリケット選手において、最適な視力矯正を行わなくても打撃成績は損なわれなかったという報告があり(Mann et al., 2007)、球技競技において空間分解能の高さ(形態視能の優劣)よりも運動視能の優劣のほうが重要であることを示唆している。では、どのような計測であれば球技競技のスポーツパフォーマンス発揮に大きく寄与していると考えられる運動視能を評価することができるのかを、以下から述べていく。

1.2. 運動方向弁別課題の構築

球技競技者には、ボールや相手選手などの動き手がかりとして身体運動をするため、物体の“動き”の方向や速度の検出・弁別に関わる運動視能が重要である。運動視の中枢は、大能皮質の五次視覚野（V5、または MT と呼ばれる）であり、背側視覚経路に存在する。MT のニューロンのほとんどが運動方向・速度に選択性を持ち、視覚応答の強度が運動の知覚と強く相関しているだけでなく (Britten, 1996; Britten, 1992; Newsome, 1989)、MT の機能を薬理的に抑制させる、もしくは、損傷させると運動が知覚できなくなる (Newsome, 1988; Newsome, 1985; Zihl et al., 1983)。したがって、運動方向の弁別するために必要な情報は MT で処理されていると考えられ、運動視能の評価は、言い換えると、MT の機能評価を指すが、これまで運動視能の評価法が確立されてこなかったため、そもそも球技競技者は非競技者と比較して運動視能が優れているのか、運動視能がどれほどスポーツパフォーマンスに貢献しているのか、については不明なままであった。

そこで、運動視に関する研究で用いられてきた“動くドット (Random dot kinematgram、以下 RDK) 刺激”を視覚刺激として採用し、ランダムな方向に動くドット群の中で同じ方向に動くドットがある割合で存在する領域をターゲットとして、そのターゲット内の運動方向を弁別させる課題を構築した。視覚刺激として用いた RDK 刺激は、複数のドットが同一方向に動くことで、特定の形を持たず動き情報 (運動方向) を定義することができるため、特定の形・輪郭に応答する形態視の賦活化を引き起こさずに MT を賦活させることができ、運動視のみを定量評価することができる。

1.3. 目的

本研究では、構築した運動方向弁別課題を用いて、球技競技者の運動視の特性・機能的役割・神経機構を明らかにすることを目的とし、1) 大学卓球競技者と球技未経験者の運動視能に優劣があるか、2) 運動視能が視覚運動パフォーマンスへ寄与するか、3) 運動視能の神経基盤としての脳波成分に運動方向弁別課題の成否と関係する脳活動がみられるか、についての 3 点を検討した。

第 2 章 球技競技者と球技未経験者の運動視能

2.1. 背景と目的

球技競技者は、ボールや相手選手の“動き”を手がかりに身体運動を実行するため、運動視経路の視覚情報処理能力の貢献が大きく、また、その処理能力は非競技者と比較して優れていることが考えられる。しかし、これまでにヒトの運動視経路を定量評価する方法がなかったため、球技競技者と非競技者の運動視能に優劣があるかどうかは不明なままであった。

そこで第 2 章では、視覚刺激として、運動視の研究で広く用いられてきた RDK 刺激を採用し、構築した運動方向弁別課題を大学卓球競技者と球技未経験者に対して実施し、運動視能に優劣があるのかを検証することを目的とした。

2.2. 方法

2.2.1. 実験参加者

視力もしくは矯正視力が正常（0.8 以上）である卓球競技歴が 7 年以上である大学卓球競技者 17 名（男性 13 名、女性 6 名、 19.5 ± 0.8 歳）と球技未経験者 9 名（男性 4 名、女性 5 名、 19.4 ± 0.5 歳）が本研究に参加した。大阪大学研究倫理審査委員会が承認した実験計画書（承認番号：H30-3）をもとに本研究の目的と内容についての説明を実施し、全ての実験参加者からインフォームドコンセントを得た。

2.2.2. 実験装置

視覚刺激の呈示には、机上に設置した液晶ディスプレイ（ProLite G2773HS-GB2、Iiyama 社、日本；解像度 1920×1080 ピクセル、リフレッシュレート 100Hz、平均背景輝度 30cd/m^2 ）を用いた。実験参加者の頭部を、ディスプレイ中央にくるように机上に設置した顎台（TKD-UK1、ナモト貿易社、日本）を用いて固定し、実験参加者の眼前からディスプレイの距離を 57cm とした。実験参加者はジョイスティック（JC-AZ01BK、elecom 社、日本）のレバーを右手で操作し課題の回答を行った（図 2-1）。

実験参加者の眼球運動は、USB カメラ（Grasshopper3、Point Grey 社、日本）を用いて、実験参加者の右眼を計測した。

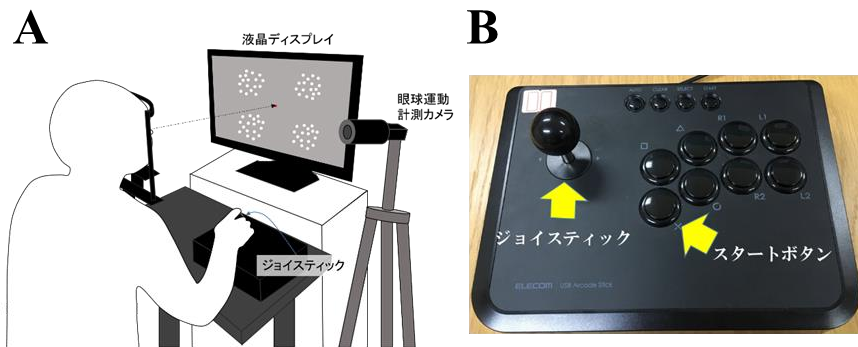


図 2-1. 運動方向弁別課題の実験概要図(A)と運動方向入力ボックス(B)。実験参加者の頭部を液晶ディスプレイから 57 cm 離れた位置になるよう顎台にて固定した。実験参加者は、右手で入力ボックスのジョイスティックを握り、知覚・弁別したターゲットの運動方向にジョイスティックを倒すことで回答した。液晶ディスプレイの横に設置した CCD カメラで眼球運動を記録し、実験参加者が課題遂行中、注視点を固視できているかをモニタリングした。

2.2.3. 視覚刺激

視覚刺激として、RDK 刺激を採用した。刺激の生成には、Python と Psychopy を用い、机上に設置した液晶ディスプレイのウィンドウ内に白いドット刺激（直径 0.1° 、ライフタイム 180 msec (18 frame)、ドット密度 1.5 dots/deg、RGB(1,1,1)) を、また、画面中央には赤い注視点（直径 X° 、RGB(1,0,0)、 $(x, y) = (0, 0)$ ）を呈示した。ドット刺激には、ターゲット刺激（直径 8° ）と非ターゲット刺激（直径 8° ）とバックグラウンドノイズ刺激（ターゲット刺激および非ターゲット刺激以外の全画面）がある。ターゲット刺激の運動コヒーレンスは 1~100%、非ターゲット刺激とバックグラウンドノイズ刺激の運動コヒーレンスは 0%（すべてのドットがランダムな方向に動く刺激）に設定した。

ターゲット刺激および非ターゲット刺激の呈示位置は、注視点を基準とした水平線を 0° とした際の 45° （右上）、 135° （左上）、 225° （左下）、 315° （右下）の 4 方向で、注視点から視角 8° （Near 条件）、 12° （Middle 条件）、 16° （Far 条件）離れた 3 種類の位置（距離条件）に設定した（図 2-3 左）。各距離条件における 4 箇所のいずれか 1 箇所にターゲットが出現し、残りの 3 箇所には非ターゲット刺激が呈示され、試行ごとにターゲットの出現位置はランダムに変化した（図 2-2）。ターゲット刺激の運動方向は、上・下・左・右のいずれかとして、試行ごとに運動方向をランダムに変化させた。

ターゲット刺激は、運動コヒーレンス 0%で呈示され、1 秒かけて所定の運動コヒーレンス値まで増加し、その後 7 秒間は同じ運動コヒーレンス値を維持した。

ターゲット刺激と非ターゲット刺激のみを呈示する条件を BG ノイズ無し条件（Non-BG noise 条件、図 2-3 右上）、それらの刺激以外の領域全体にも運動コヒーレンス 0%のバックグラウンドノイズ刺激を呈示する条件を BG ノイズあり条件（BG noise 条件、図 2-3 右下）として課題を行った。

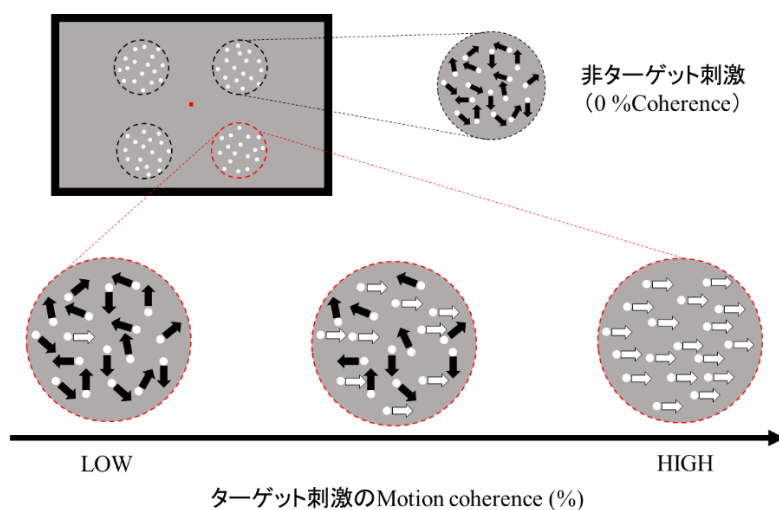


図 2-2. 視覚刺激の概要図。視覚刺激として、特定の方向に動くドットが含まれるターゲット刺激（運動コヒーレンス $>0\%$ ）と、含まれない非ターゲット刺激（運動コヒーレンス $=0\%$ ）およびバックグラウンド（BG）ノイズ刺激（運動コヒーレンス $=0\%$ ）を呈示した。BG ノイズ刺激は、ランダムな方向に動くドット刺激として、ターゲット刺激や非ターゲット刺激を取り囲む画面全体に呈示された。

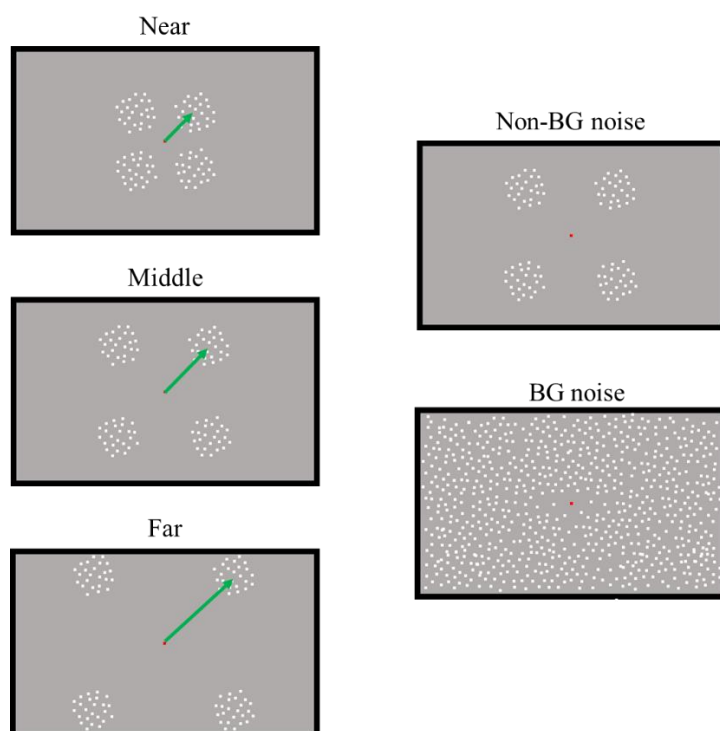


図 2-3. 課題実施条件の概要図。視野内の位置によって運動視能が異なるのかを調べるために、視覚刺激呈示領域を、注視点から視角 $8^\circ \cdot 12^\circ \cdot 16^\circ$ の 3 種類の位置に設定した（図左；それぞれ、Near・Middle・Far 条件とした）。また、この Near・Middle・Far 条件を Non-BG noise 条件と BG noise 条件で実施した（図右）。

2.2.4. 階段法による運動方向弁別課題と実験手順

課題開始に先立ち、実験参加者の頭部を椅子座位姿勢にて顎台に固定した。実験参加者は任意のタイミングで運動方向入力ボックスのスタートボタンを押して課題を開始した。実験参加者には、注視点を固視した状態でターゲット刺激の運動方向をジョイスティック操作にて回答するように教示した。実験参加者が正しい運動方向を回答すると正答、誤った運動方向を回答する、もしくは回答せずに 8 秒経過すると誤答とした。実験参加者には、回答直後に正誤で異なる音をフィードバックとして与えた。8 秒以内に回答できなかった場合は音のフィードバックを与えなかった。

本章の課題では、実験参加者の運動コヒーレンス弁別可能閾値を計測するために階段法を採用した。ターゲット刺激の運動コヒーレンスは課題の成否に基づいて試行ごとに变化した (1-up/1-down)。課題の 1 試行目のターゲット刺激の運動コヒーレンスは 100% で開始され、以降、正答すると 2 試行目のターゲット刺激の運動コヒーレンスは 1 ステップ分 (10%) 減少して 90% となり、さらに正解すると 3 試行目では 80% に減少した。この試行で誤答となった場合は、4 試行目のターゲット刺激の運動コヒーレンスは 1 ステップ分 (10%) 増加して 90% となった。なお、本研究では、運動方向の弁別可能閾値をより早く、正確に推定するために、ターゲット刺激の運動コヒーレンスを高コヒーレンス (100~50%)、中コヒーレンス (46~10%)、低コヒーレンス (9~1%) の 3 つのゾーンに大別し、各ゾーンにおける 1 ステップ分の運動コヒーレンス変化値を 10%、4%、1% とした (Mizuyama et al., 2016; Soma et al., 2013; Tsunoda et al., 2019)。図 2-4 に、階段法による運動方向弁別課題をすべての試行で正答した場合のターゲット刺激の運動コヒーレンスの推移を示す。これにより、運動方向弁別が容易な高コヒーレンスゾーンでは急速に運動コヒーレンス値が減少し、弁別可能域に近づく中あるいは低コヒーレンスゾーンでは、細やかに運動コヒーレンス値が変化することで、より正確に弁別可能閾値を計測することが可能になっている。図 2-5 に、実際に一人の実験参加者が本課題を行った時の典型例 (Middle×Non-BG noise 条件) を示す。この実験参加者は、高コヒーレンスゾーンではすべて正答し、中コヒーレンスゾーンで誤答が生じ始め、最終的に 14% の運動コヒーレンスまで運動方向を弁別することができたことが分かる (運動方向弁別閾値 = 14%)。したがって、運動コヒーレンス感度 (MCS ; Motion Coherence Sensitivity、「2.2.6. 計測と解析」にて詳細記載) は 7.14 (MCS = 100/14 (%)) と評価された。

実験参加者は、課題に慣れるために本実験の数日前に来研し、運動方向弁別課題を Middle×Non-BG noise 条件と Middle×BG noise 条件でそれぞれ 5 回以上 (最大 8 回) 実施した。

実験参加者は、本実験当日、6 つの課題条件 (2 BG noise × 3 distance) で課題を実施した。ただし、Non-BG noise × 3 distance で課題を行った後 (3 条件)、BG noise×3 distance で課題を行った (3 条件)。3 distance は、実験参加者ごとにランダムオーダーとした。それぞれの課題条件は、練習 2 回と本実験 3 回の計 5 回の課題で構成された (図 2-6)。

視覚刺激を見つめることによる眼精疲労等の要因を除くため、課題実施中以外は実験参加者の任意のタイミングで休憩をとった。

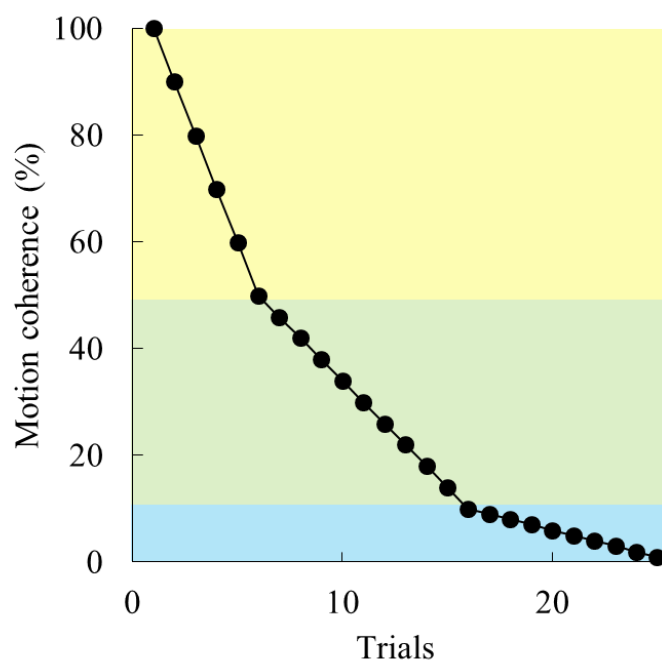


図 2-4. 階段法による運動方向弁別課題をすべての試行で正答した場合のターゲット刺激の運動コヒーレンスの推移。実験参加者の回答の正否に応じて次の試行で変化させる運動コヒーレンスの1ステップ分の変化値は、3つのゾーンで異なっており、黄色で示した高コヒーレンス帯域（100～50%）は10%、緑で示した中コヒーレンス帯域（46～10%）は4%、青で示した低コヒーレンス帯域（9～1%）は1%として設定した。

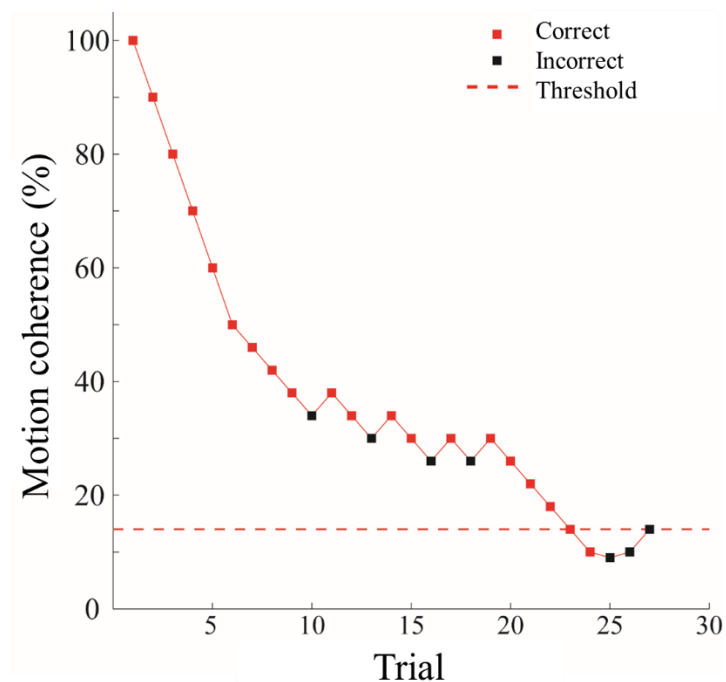


図 2-5. 階段法による運動方向弁別課題により得られた結果の典型例と運動コヒーレンス閾値。赤の四角は正答試行、黒の四角は誤答試行を示す。赤の点線はこの課題から得られた運動コヒーレンス閾値が 14%であったことを示し、運動コヒーレンス感度（MCS）は 7.14（ $MCS = 100/14$ （%））として算出された。

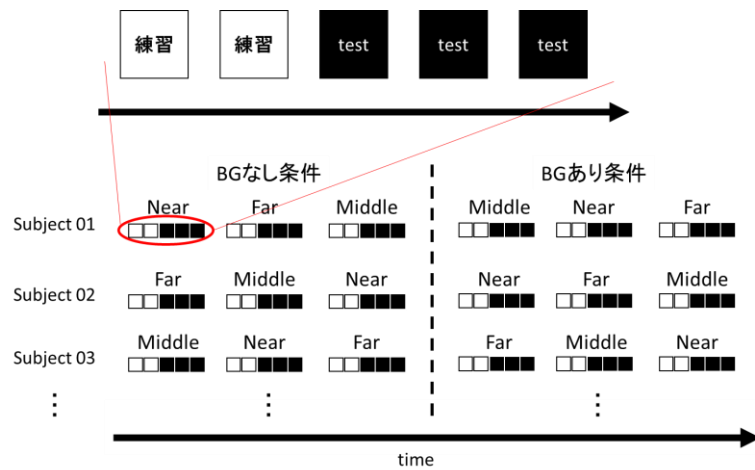


図 2-6. 実験プロトコルの概要図。白の四角は練習セッション、黒の四角は解析対象となるテスト（本実験）セッションを示す。一つの刺激条件について、2 回の練習セッションと 3 回のテストセッションを実施した。

2.2.5. 計測と解析

運動方向弁別課題の成績（運動コヒーレンス感度）

課題は、連続した 5 試行の課題成績（正答率）が 60%を下回ると終了し、正しく弁別できた直近 3 試行時の運動コヒーレンスを平均した値を運動方向弁別閾値（運動コヒーレンス閾値；MCT、Motion coherence threshold）とした（図 3-5）。運動コヒーレンス閾値の逆数を運動コヒーレンス感度として算出し（ $MCS = 100 / MCT$ ）、これを運動視能の指標とした。視覚刺激条件ごとに、3 回の本実験で算出した運動コヒーレンス感度の平均値を実験参加者の運動コヒーレンス感度として算出した。

2.2.6. 統計処理

統計ソフト R（version 3.4.4、R Development Core Team）を用い、グループ（大学卓球競技者、球技未経験者）×注視点からターゲット刺激までの距離（Near、Middle、Far）を要因とする二元配置分散分析を、ノイズ条件（Non-BG noise、BG noise）別に行い、Holm 法を用いて多重比較検定を行った。有意水準は $p < 0.05$ とした。

2.3. 結果

本課題では、ヒトやサルなどの様々な動物種(Bischof, 1999; Britten, 1992; Douglas et al., 2006; Newsome, 1989; Pilz et al., 2017)における運動視研究で広く用いられてきた RDK 刺激を視覚刺激として採用した。正答時に運動コヒーレンスを段階的に減少させていくことで、実験参加者の運動方向弁別可能な最小運動コヒーレンス（運動コヒーレンス閾値）を測定し、その逆数を運動コヒーレンス感度として算出して運動視能の指標とした。大学卓球競技者と球技未経験者の運動視能を、視野内の空間位置や背景ノイズとの関係から検討した。

2.3.1. 運動コヒーレンス感度

運動方向弁別課題を実施した大学卓球競技者の試行回数とターゲット刺激の運動コヒーレンス値の推移についての典型例（ノイズ条件別）を図 2-7 に示す。水平線は各ターゲット刺激位置条件における運動コヒーレンス閾値を示しており、背景ノイズの有無に関わらず、ターゲット刺激位置が中心から遠ざかるほど閾値は上昇していた。このことから、視野の中心から周辺にかけて運動コヒーレンス感度は低下することが明らかとなった。

一方、Non-BG noise 条件と BG noise 条件の比較においては、背景ノイズがあることで、いずれのターゲット刺激位置においても、運動コヒーレンス閾値は上昇することが観察された。そのため、背景ノイズはターゲット刺激とは空間的に重ならないものの、知覚な動きの検出を妨げる作用を有することが明らかになった。

図 2-8 に運動方向弁別課題における試行回数とターゲット刺激の運動コヒーレンス値の推移について全実験参加者の結果を平均値として示す。水平線は各ターゲット刺激位置条件における運動コヒーレンス閾値の平均値を示している。Non-BG noise 条件（図 2-8A・C）における運動コヒーレンス閾値は、大学卓球競技者（黒色の水平の実線および破線）と球技未経験者（灰色の水平線）のいずれの群においても、注視点からのターゲット出現距離に依存して上昇する傾向にあった。一方、ターゲット刺激出現位置ごとに、大学卓球競技者と球技未経験者を比較すると、Middle 条件において大学卓球競技者の方が球技未経験者よりも運動コヒーレンス閾値が低い傾向にあった。このことから大学卓球競技者は同一方向に動くドットの割合が小さく、視覚系に対する運動信号が弱い場合であっても、球技未経験者より視覚性の運動を検出し、その運動方向を弁別できる可能性が示唆される。

次に、BG noise 条件（図 2-8D・F）における運動コヒーレンス閾値は、Non-BG noise 条件と同様にターゲット出現距離に依存して上昇する傾向にあり、その傾向は Non-BG noise 条件よりも顕著であった。また、Middle 条件における運動コヒーレンス閾値の大学卓球競技者と球技未経験者の差もより顕著になることがわかった。これらの結果は、卓球競技者と球技未経験者の運動コヒーレンス閾値の違いは、ターゲット出現距離と背景ノイズの両方の要因によって影響を受けることがわかった。

そこで、大学卓球競技者と球技未経験者の運動視能の特色および差異を明らかにするために、運動コヒーレンス閾値の逆数である運動コヒーレンス感度を運動視能の指標とし、ターゲット出現距離や背景ノイズとの関係からポピュレーション解析を行った（図 2-9）。

大学卓球競技者と球技未経験者の競技経験の違いと注視点からのターゲット出現距離の2つを要因として運動コヒーレンス感度について二元配置分散分析を実施した結果、Non-BG noise 条件において、競技経験の違いによる主効果は認められなかったが ($F_{1,16} = 2.40, p > 0.05$)、ターゲット出現距離のみ主効果が認められた ($F_{2,48} = 13.54, p < 0.01$)。ターゲット出現位置別の運動コヒーレンス感度の多重比較の結果、Far 条件の運動コヒーレンス感度と比較して、Near 条件の運動コヒーレンス感度が有意に高く ($p < 0.01$)、また、Middle 条件の運動コヒーレンス感度も高い傾向にあった ($p = 0.063$)。これらの結果は、競技経験に関わらず、ターゲット出現距離に依存して運動コヒーレンス感度が低下することを示唆している。

BG noise 条件においても、ターゲット出現距離の主効果 ($F_{2,48} = 12.80, p < 0.0001$) が認められ、競技経験の主効果も傾向が認められた ($F_{1,24} = 8.10, p < 0.10$)。さらに競技経験とターゲット出現位置の交互作用 ($F_{2,48} = 3.94, p < 0.01$) も認められた。まず、ターゲット出現位置について Post-hoc test を実施したところ、大学卓球競技者における Near 条件と Middle 条件の運動コヒーレンス感度に有意な差はないが ($p = 0.84$)、Far 条件と比較して有意に高値であることは認めた ($p < 0.01$)。一方、球技未経験者においては、Middle 条件と Far 条件と比較して、Near 条件の運動コヒーレンス感度が高い傾向であり ($p = 0.070$ vs. Middle 条件、 $p = 0.080$ vs. Far 条件)、Middle 条件と Far 条件の運動コヒーレンス感度に有意な差はなかった ($p = 0.95$)。このように球技未経験者が Near 条件から Middle 条件にかけて運動コヒーレンス感度が低下するのに対して、卓球競技者では顕著な低下は示さず、Middle 条件以降で低下し始めることが明らかになった。

次に、BG noise 条件における競技経験について Post-hoc test を実施したところ、Middle 条件で有意に高い運動コヒーレンス感度を示した ($F_{1,24} = 15.41, p < 0.01$)。一方、Near 条件・Far 条件では両群間の運動コヒーレンス感度に有意差は認められなかった。そのため、卓球競技者の運動視能は、全視野領域で優れているわけではなく、特定の視野領域においてのみ機能改善が生じていることが示唆された。

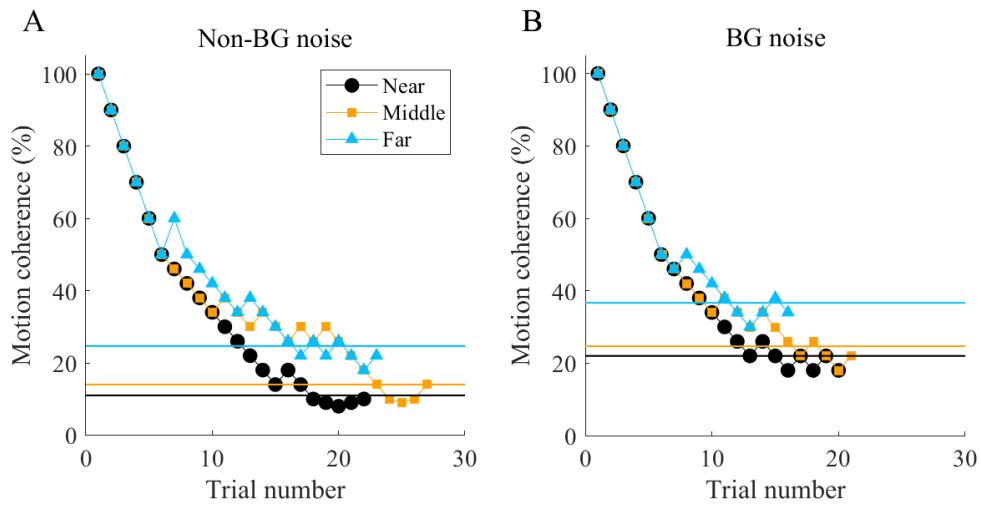


図 2-7. 運動方向弁別課題（階段法）遂行推移の典型例。黒い丸は Near 条件、オレンジの四角は Middle 条件、青い三角は Far 条件での課題遂行の推移を示す。Motion coherence (y 軸) に対する垂線は、各条件の平均運動コヒーレンス閾値を示す。大学卓球競技者の Non-BG noise 条件 (A)、大学卓球競技者の BG noise 条件 (B) を示す。

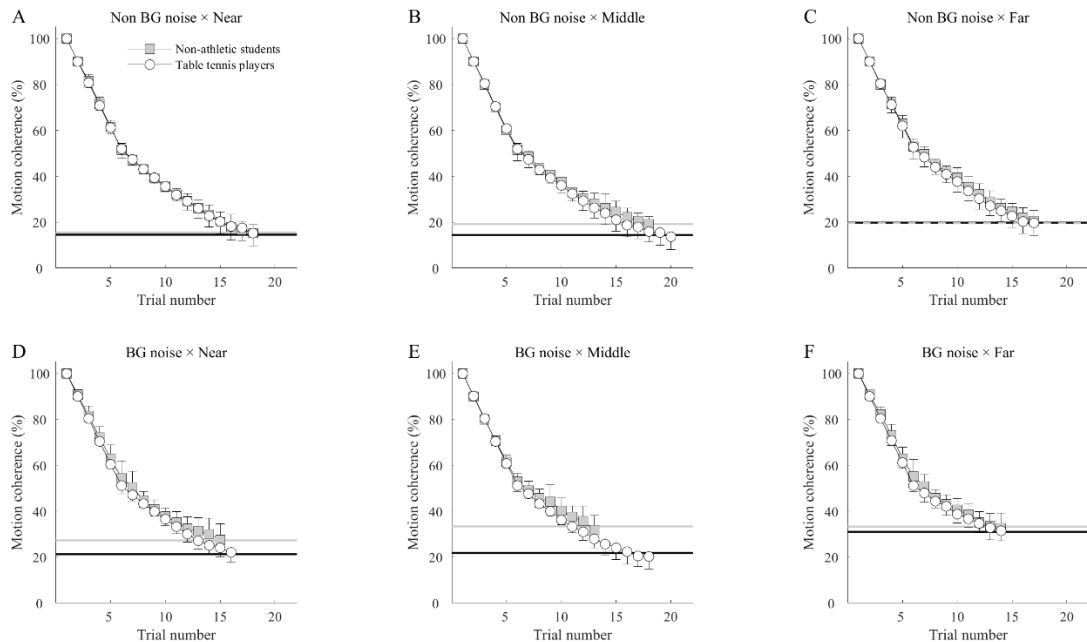


図 2-8. 各条件における運動コヒーレンス閾値。A-C は Non-BG noise 条件、D-F は BG noise 条件。丸は大学卓球競技者、四角は球技未経験者を示す。Motion coherence に対する黒の垂線は大学卓球競技者、グレーの垂線は球技未経験者の平均運動コヒーレンス閾値を示す。エラーバーは標準誤差を示す。

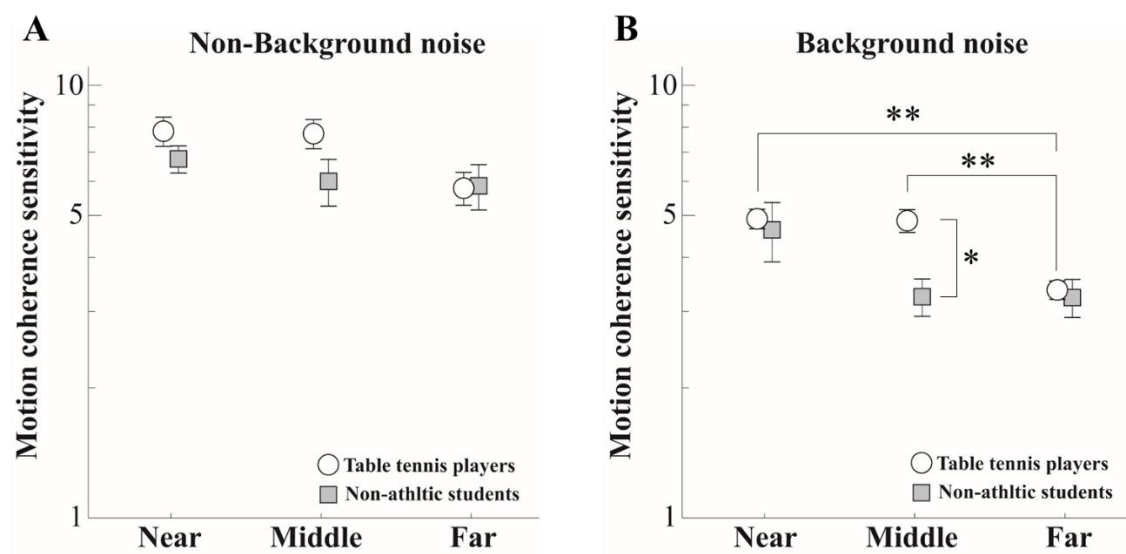


図 2-9. Noise 条件別の運動コヒーレンス感度。丸は大学卓球競技者、四角は球技未経験者を示す。エラーバーは標準誤差を示す。* $p < 0.01$ vs. Far 条件 (BG noise)、* $p < 0.01$ vs. 球技未経験者 (BG noise × Middle 条件)

2.4. 考察

実際の球技競技のパフォーマンスを左右する最も重要な視対象はボールであり、ボールには形や色、動きの方向・速度などの様々な視覚属性が含まれている。それらの視覚情報は、脳において腹側視覚経路と背側視覚経路で並列に処理されていることが知られている (Goodale and Milner, 1992)。腹側視覚経路は空間分解能が高いが、処理速度は遅く (Peichl and Wassele, 1979)。一方、物体の動きの方向や速度の情報を処理している背側視覚経路 (運動視) は、空間分解能は低いが、処理速度は速いことが報告されている (Peichl and Wassele, 1979)。そのため、球技競技者にとっての視覚情報処理は、腹側視覚経路ではなくむしろ背側視覚経路の運動視機能が重要であると考えられる。しかし、競技者の運動視能を計測する方法論がこれまで無かったため、本研究において“動くドット刺激を用いた運動方向弁別課題”を構築し、大学卓球競技者と球技未経験者の運動方向弁別能を比較検討した。その結果、背景ノイズがある状況において、大学卓球競技者は球技未経験者と比較して優れた運動視能を有していること、また、その優位性は注視点から視角 12° の周中心視野領域でのみ観察されることが明らかになった。

2.4.1. 背景ノイズが運動視能に与える影響

本研究の結果から、大学卓球競技者は球技未経験者と比べて運動視能 (運動コヒーレンス感度) が優れており、その特性として、背景ノイズがある場合、また、視野領域においても周中心視野領域で優位性があることが明らかになった。そこで、以下では、背景ノイズと視野領域の観点から議論する。

運動視能と背景ノイズとの関係を考える上で、本研究における運動方向検出課題の成否がどのような要因によって決定されるのかを理解する必要がある。課題遂行中、実験参加者は“ターゲット刺激の検出”と“運動方向の弁別”という少なくとも 2 つの心的プロセスを必要とし、ターゲット刺激を検出するためには、“同じ方向に動くドットの局所的な動き”を統合して、“一つのまとまった動き”として運動情報を処理し知覚することが必要である。背景ノイズがない条件では、このプロセスの成否が課題の成否を決定すると考えられ、統合された全体としての運動信号 (シグナル) の強度が、ランダムな方向に動く他のドットの信号 (ノイズ) の強度よりも大きいほどシグナルの分離が容易となり、ターゲット刺激検出率が高くなる。ターゲット刺激の運動コヒーレンスが高い場合に誤答が少ないことも、同じ理由で説明が可能である。大学卓球競技者と球技未経験者における背景ノイズがない条件での運動コヒーレンス感度に有意な差異は認められなかったものの、Middle 条件で大学卓球競技者の方が高い傾向にあり、大学卓球競技者は局所運動信号の統合能やシグナル増強能あるいはノイズの低減能に優れている可能性がある。

一方、背景ノイズがある場合は、ターゲット刺激内のノイズに加え、その周囲にあるドット群のランダムな動きもターゲット検出を妨害するノイズとして作用する。私たちは特定の物体を認識したり、動きを判断したりする際に、視対象となる物体の情報をそれ以外の背

景情報から分離する必要がある、分離されて始めて認識や判断の対象となる。この知覚的な分離作用のことを図地分化と呼び、運動方向や速度の違いも視対象と背景を分離するための重要な手掛かりとなる。背景ノイズが有る場合、ターゲット刺激周囲のドットにも動きがあるため、ターゲット刺激内の運動信号強度と周囲のノイズ強度の差異の程度が、課題の成否を左右する要因となる。大学卓球競技者は背景ノイズのある条件下で有意に高い運動コヒーレンス感度を示したことから、ターゲット刺激内の“運動信号・ノイズ分離能”だけでなく、空間的に異なる位置での“運動信号・ノイズ分離能”が優れていることが予想される。

このような異なる空間位置における“運動信号・ノイズ分離能”は、スポーツの実場面においても重要な役割を果たすと考えられる。例えば、卓球でのゲームを考えた場合、プレイヤー自身が動くことで、卓球台などの静止物体を含む背景全体の網膜像が動くことになり、プレイヤーはそのような網膜像の動きの中で、高速移動するボールの運動情報を処理する必要がある。そのため、卓球競技者は、常に動きを手掛かりとした図地分化と視標の動きの分析を求められており、異なる空間位置における運動信号・ノイズ分離能は、競技パフォーマンスを左右する重要な要因であると考えられる。

大学卓球競技者の運動コヒーレンス感度が高い理由として 2 点考えられる。一つは、高速で動く視標（ボールなど）を見る・反応するトレーニング（練習）を日々行うことによって、運動視中枢である MT 野の運動信号に対する視覚反応性が改善されている可能性である。視覚系は視覚経験によって可塑的变化を生じることが知られている。視覚刺激として特定の傾きを持ったグレーティング（縞）刺激を用い、高コントラスト条件で視覚系をより強く賦活化させる介入をラットに連日行くと、介入で用いた縞刺激に対する検出感度が上昇することが報告されている。このような感覚刺激を反復して入力することで生じる長期的な知覚感度の上昇現象を知覚学習と呼び、卓球競技者においては背側視覚経路で同様な知覚学習効果が生じていることが予想される。さらに、ラットの大脳皮質一次知覚野（V1）の視覚刺激に対する神経応答を調べた先行研究では、視覚刺激だけの介入よりも、運動中に視覚刺激を呈示する組み合わせ介入を反復することで、同一視覚刺激に対する視覚応答が増加することが報告されている(Kaneko et al., 2017)。卓球競技者は、日々の練習の中で身体運動を伴う形でボールの動きを見る視覚経験を積んでおり、このような経験が背側視覚経路の機能改善につながったことが考えられる。この点については、第 4 章で議論する。

大学卓球競技者の運動コヒーレンス感度が高い二つ目の理由として、課題遂行中の注意の向け方がある。視覚刺激呈示に対する単純反応時間や弁別精度を調べた先行研究は、刺激呈示位置が予告されていると、実験参加者の注意が刺激呈示予定位置に向かうことで反応時間の短縮や精度の上昇が起こることを報告している。それらの神経機構も検討されており、運動方向弁別課題を遂行中のサルは MT から神経活動を記録した先行研究では、サルが記録中のニューロンの受容野に注意を向けた場合の視覚応答が、それ以外の場所に注意を向けた場合の視覚応答よりも大きいことを報告している(Maunsell and Cook, 2002; Seidemann, 1999; Treue and Maunsell, 1996)。これは、注意を向けた視野内の“動き情報”

の検出・弁別が促進されることを示唆し、本研究においても 4 つのターゲット出現位置全体をカバーするように注意が向けられれば、動きの検出感度や精度が高くなることが予想される。しかし、現時点では、大学卓球競技者と非競技者において注意の向け方に違いがあったかどうかについては明らかでない。これについては今後のさらなる検討が必要である。

2.4.2. 視覚刺激の空間的位置と運動視能の関係

本研究から、大学卓球選手は、球技未経験者に比べて視角 12° の周辺視においてのみ高い運動コヒーレンス感度を有することが明らかになった。このことは卓球競技において特定の周辺視野領域からの運動信号がプレーに重要な役割を果たしていることを示唆する。卓球ゲームにおける競技者の視線は常にボールの軌道を追跡できるわけではなく、むしろ、対戦相手が打球する場面でのボールに視線を向け、ボールの運動情報を処理することで、ボールの予測到達地点にサッカードする（急速に目を動かす）ことが知られている。この時、打球されたボールは速やかに中心視野領域から周辺視野領域に向かって飛来する。そのため、中心視野だけでなく周辺視野における運動情報処理が正確なボール軌道予測のために重要な役割を果たすと考えられる。周辺視野は中心視野よりも空間解像度が低く、周辺視野の中でも中心視野から離れるほど空間解像度はさらに低下することが知られている。そのため、視角 16° を超えるような周辺視野ではボールの軌道を正確に予測するには適していないことが予想され、中心視野に近い周辺視野での運動視能が大学卓球競技者で高いことは理に適っていると考えられる。

2.4.3. 既存の視機能計測との相違点

これまでのスポーツに関係する視機能の計測には、ランドルト環を高速移動させ、その切れ目を弁別する課題を用いた DVA (Dynamic visual acuity; 動体視力) の評価が行われてきた。野球やテニス、バドミントンといった、速いボールやシャトルなどに対して身体的に反応することが求められる競技者は、非競技者と比較して優れた DVA を有していることが報告されている(Ishigaki, 1993; Muinos and Ballesteros, 2015; Rouse, 1988; Uchida et al., 2012)。しかし、DVA はランドルト環の形の弁別課題となっており、主に腹側視覚経路の機能を計測していたと考えられ、どれだけ空間分解能の高い中心窩付近で指標を捉えることができたのか、すなわち、眼球運動により指標を追従できたのかを反映していると考えられる。この点を調べた先行研究では、DVA 計測時に自由な眼球運動を許可する条件と固視点を注視した条件の 2 条件を設定し、野球競技者と非競技者の各条件における DVA を比較した。その結果、視線行動を自由にした条件では野球競技者の DVA が有意に優れていたものの、注視条件では両者の DVA に違いがないことが明らかになった(Uchida et al., 2012)。このことから、競技者の優れた DVA は、背側視覚経路の処理能力というよりも、眼球運動の視標追従能力に起因していることが考えられる。そのため、これまでの DVA 計測では、背側視覚経路の情報処理能力（運動視能）を評価できていないと思われる。

背側視覚経路の運動視能を定量評価するためには、腹側視覚経路の寄与を除く必要があり、そのためには、腹側視覚経路のニューロンを賦活させる要因となる形情報を視覚刺激から除く必要がある。これを可能とする刺激が“動くドット刺激”であり、運動視の研究では古くから用いられてきた。特に、サルを用いた電気生理学的・心理物理学的研究では、運動方向弁別課題遂行中の動物の背側視覚経路の各視覚領野から神経活動を記録し、運動知覚に関わる神経機構を明らかにしている。ほとんどの MT ニューロンはドット刺激の運動方向に選択性を示し、各ニューロンに対して好みの運動方向の刺激を呈示した場合でも、運動コヒーレンスに比例して視覚反応の強度が増加することわかっており、運動方向と運動信号の強さが脳内表現されていると言える。そして、MT で表現された運動情報が頭頂連合野にある LIP (Lateral intraparietal cortex) に送られることで、“ドットがどの方向に動いているのか”に関する動物の知覚的判断(知覚的意思決定)が為されると、考えられている。事実、サルの MT のニューロンの視覚応答の強さと運動方向弁別課題の成績には相関関係があり(Britten, 1996; Britten, 1992; Newsome, 1989; Salzman, 1990)、また、抑制性神経伝達物質である GABA 受容体のアゴニスト(ムシモール)を MT に直接投与することで、ドット刺激の運動方向弁別閾値が上昇することが明らかになっている。そのため、動くドット刺激が作り出す運動方向の弁別には、背側視覚経路の MT が主に寄与していると考えられる。

以上の先行研究を踏まえると、本章で用いた運動方向弁別課題で評価した運動コヒーレンス感度は、運動信号に対する MT の視覚反応性を反映していることが考えられる。この点については、第 4 章の研究テーマとして、hMT/MST (medial superior temporal) からの脳波計測を実施し、動くドット刺激に対する事象関連電位についての分析を行った。

第3章 視覚運動パフォーマンスへの運動視能の寄与

3.1. 背景と目的

球技スポーツでは、視覚から得られる情報に基づいて身体運動が発現し、脳では「視覚情報処理」「視覚・運動変換処理」「運動情報処理」などの情報処理が行われている。このような視覚情報に基づいて行なう身体運動は視覚運動と呼ばれており、飛んでくるボールをキャッチしたり打ち返したりなど、球技スポーツで行われる身体運動のほとんどは視覚運動と言える。そのため、視覚運動のパフォーマンスには、筋収縮のための運動指令形成に関わる運動情報処理だけでなく、視覚情報処理の中でも特に運動視に関わる情報処理が重要な役割を果たすと考えられる。

そこで本章では、運動視能と視覚運動パフォーマンスの関係を調べるために、自身が開発した運動方向弁別課題の成績と青山が開発した視覚運動課題の成績の相関関係を検討した。

3.2. 方法

3.2.1. 実験参加者

視力もしくは矯正視力が正常（0.8 以上）である球技競技者 5 名（ 20.8 ± 1.3 歳）が本研究に参加した。大阪大学研究倫理審査委員会が承認した実験計画書（承認番号：H30-3）をもとに本研究の目的と内容についての説明を実施し、全ての実験参加者からインフォームドコンセントを得た。

3.2.2. 実験装置

運動方向弁別課題には、第2章と同様の装置・設置位置で実験を実施した。ただし、本章では、実験対象者の眼球運動計測は行わなかった（図 3-1）。

視覚運動課題においても、視覚刺激の呈示には運動方向弁別課題を同様の液晶ディスプレイ（ProLite G2773HS、27 型、リフレッシュレート 144Hz、iiyama 社製、平均背景輝度、 60 cd/m^2 ）、頭部固定には同様の顎台を用いた。視覚刺激への応答にはフォースセンサ（USL06-H5-500N、サンプリングレート 1000Hz、テック技販社、日本）を用いた。

3.2.3. 実験のデザイン

競技者が実行するパフォーマンスは常に一定ではなく、その時々で変化しており、この変動には脳の状態が関係していると考えられる。そこで、本研究では、このような個人内の脳機能の変動を利用して、同一実験参加者に対して運動方向弁別課題と視覚運動課題をセットにして様々な日あるいは時間で計測を行い、両課題の成績間での関係性を検討することとした。予備実験において第2章で用いた運動方向弁別課題を様々なタイミングで計測したところ、得られた運動コヒーレンス感度には期待した変動がみられないことが多く、本研

究目的には適していないことがわかった。そこで、様々な刺激条件を検討したところ、①注視点を設けないこと、②背景ノイズあり条件であること、③ターゲット刺激呈示位置を所定の位置ではなく、ランダムな位置にすること、④ターゲット刺激の運動コヒーレンスを 0% からスタートして 8 秒間かけて 100% に到達させること、を満たす条件での運動方向弁別課題において、実験参加者に課題成績（弁別反応時間）における適度な測定間変動が生じることが明らかになった。そこで、この課題条件を用いて視覚運動課題との関係を検討した。なお、実験参加者が本研究に参加するための基準として、課題正答率が 80% 以上に達するまで課題の練習を実施したことから、課題成績として正答率ではなく、回答までの反応時間を採用した。

3.2.4. 視覚刺激

3.2.4.1. 運動方向弁別課題

視覚刺激の生成には、第 2 章と同様に、Python と Psychopy を用い、机上に設置したディスプレイのウィンドウ内に白いドット刺激（直径 0.1°、ライフタイム 180 msec (18 frame)、ドット密度 1.5 dots/deg、RGB(1,1,1)）を呈示した。ドット刺激には、ターゲット刺激（直径 8°）とバックグラウンドノイズ刺激（ターゲット刺激以外の全画面）がある。ターゲット刺激の運動コヒーレンスは 1~100%、バックグラウンドノイズ刺激の運動コヒーレンスは 0%（すべてのドットがランダムな方向に動く刺激）に設定した。ターゲット刺激は試行開始後から 8 秒間で運動コヒーレンス（同一方向に動くドットの割合）が 0% から 100% に直線的に増加した（図 3-2）。各試行で、ターゲットの出現位置はランダムに変化した。

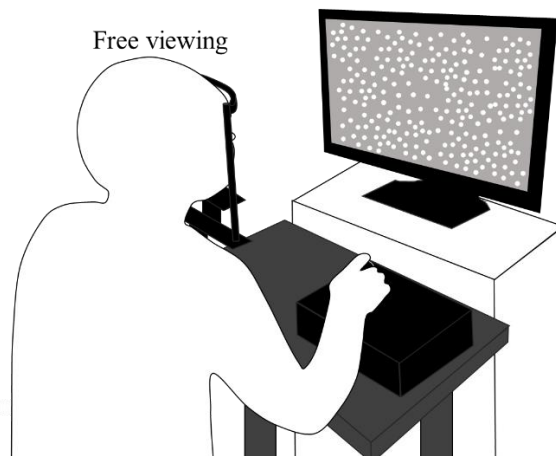


図 3-1 運動方向弁別課題の概要図。実験参加者の頭部を液晶ディスプレイから 57 cm 離れた位置になるよう顎台にて固定した。実験参加者は、右手で運動方向入力ボックスのジョイスティックを握り、知覚・弁別したターゲットの運動方向にジョイスティックを倒すことで回答した。

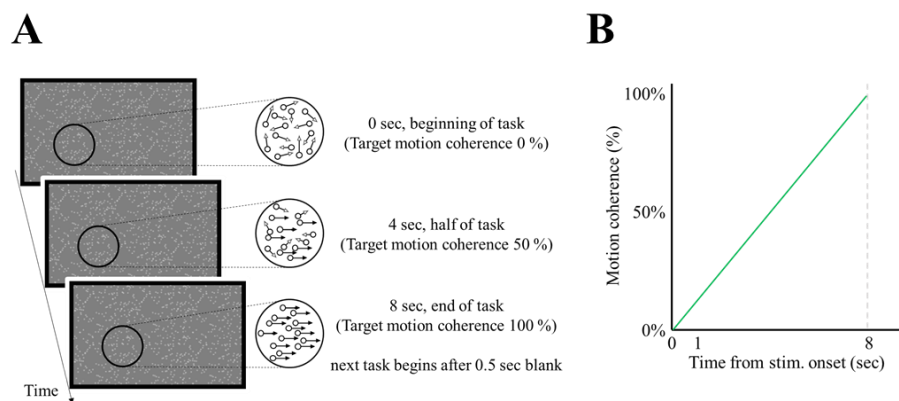


図 3-2. 運動方向弁別課題中の視覚刺激呈示概要(A)とターゲット刺激の運動コヒーレンスの時間変化(B)。
A) 視覚刺激は、特定の方向に動くドットを持つターゲット刺激と様々な方向に動くバックグラウンドノイズ刺激（運動コヒーレンス = 0%）で構成された。ターゲット刺激の運動方向は上下左右のいずれかの方向であり、呈示位置は試行ごとにランダムに変化した。B) ターゲット刺激の運動コヒーレンスは 0% から 100% まで 8 秒間かけて直線的に増加した。

3.2.4.2. 視覚運動課題

視覚刺激の生成には、Python と Psychopy を用い、机上に設置したディスプレイのウィンドウ内にガボールパッチ（ボール；直径 2°、空間周波数 1.5 cycle/degree、コントラスト 50 %、方位 90°）と白のカーソル（高さ 180 pixel × 幅 96 pixel、RGB(1,1,1)）を呈示した。ボールの移動速度を 7 条件（1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000 pixel/deg）設定し、ウィンドウの右端から左端へ等速直線運動で移動するものとした。カーソルの上下動は、フォースセンサに伝えられる力の加減圧の変化と連動させた。

3.2.5. 実験手順

運動方向弁別課題

課題開始に先立ち、実験参加者の頭部を椅子座位姿勢にて顎台に固定した。実験参加者の任意のタイミングで運動方向入力ボックスのボタンを押すと課題が開始される。実験参加者には、注視点を固視した状態でターゲット刺激の運動方向をジョイスティック操作にて回答するように教示した。課題開始と同時に、注視点とターゲット刺激とバックグラウンドノイズ刺激が呈示された。ターゲット刺激呈示直後の運動コヒーレンスは 0% であり、8 秒かけて運動コヒーレンスは 100% まで増加するよう設定した。1 試行の所要時間はターゲット刺激の運動コヒーレンスが 100% に達するまでの 8 秒間とした。実験参加者が正しい運動方向を回答すると正解、誤った運動方向を回答する、もしくは回答せずに 8 秒経過すると、誤答とした。実験参加者には、回答直後に異なる音による正誤のフィードバックを与えた。8 秒以内に回答できなかった場合には音のフィードバックを与えなかった。

運動方向弁別課題は、視覚運動課題の前に実施した。

視覚運動課題

液晶ディスプレイのウィンドウ内のカーソルを中心視で捉えられる位置で実験参加者の頭部を顎台にて固定し、座位姿勢で実験を行った（図 3-3）。課題が開始されると、ボールがウィンドウ右端のランダムな高さから出現し、左端に向かって等速直線運動で移動する。実験参加者には、移動してくるボールをウィンドウ左端に呈示されているカーソルで捕らえるように指示を与えた。実験参加者には、フォースセンサを右手の母子と示指で摘ませ、摘まむ（加圧する）と下方向へ、緩める（減圧する）と上方向へカーソルが移動すると教示した（図 3-4）。ボールは左端に到達する、もしくは、カーソルで捕らえることができると、ディスプレイ上から消失し、すぐに次のボールがディスプレイ右端のランダムな位置（高さ）から出現する。ボールの移動速度条件ごとに 30 秒間課題を行った。

視覚運動課題は、運動方向弁別課題の後に行った。コヒーレンス感度の高低が視覚運動パフォーマンスにどのような影響を与えているかを検証するために、運動方向弁別課題と視覚運動課題を一つの実験セットとし、同一個人に対して不定期に実施し、両課題の成績を比較検討した。実験参加者ひとりあたりの実験セット実施回数は 10 回程度とした。

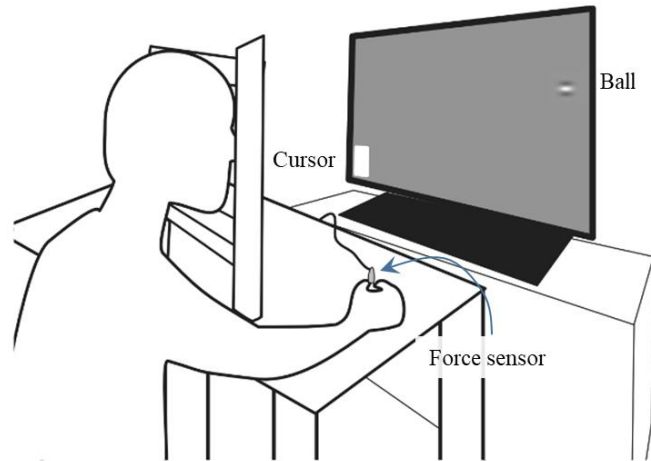


図 3-3. 視覚運動課題の概要図。実験参加者の頭部を液晶ディスプレイから 57 cm 離れた位置に顎台にて固定した。実験参加者には、右手の母指と示指でフォースセンサを摘ませ、画面右端から左端に等速直線運動するボールを、カーソル操作にてヒットさせた。

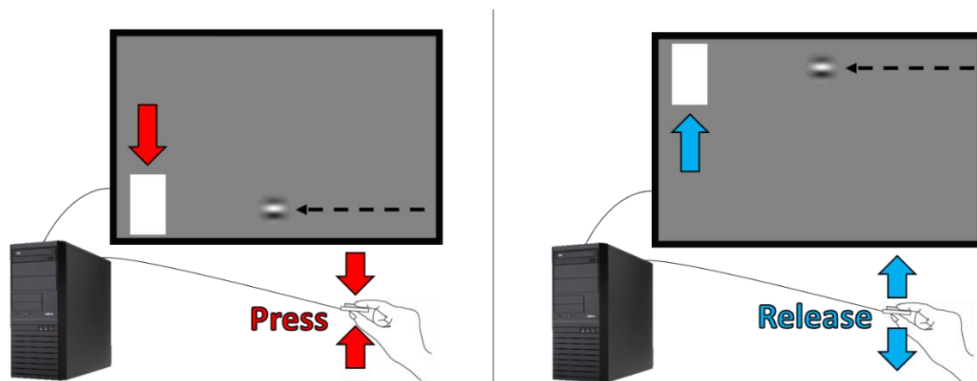


図 3-4. カーソル操作の模式図。フォースセンサを加圧するとカーソルが下に動き、減圧すると上に移動する。

3.2.6. 計測と解析

運動方向弁別課題において、ターゲット刺激が呈示されたから正答するまでの時間を弁別反応時間として評価した。

視覚性運動課題においては、実験参加者がカーソルでボールを捕らえることができた試行をヒット、捕らえることができなかった試行をミスとした。各ボール移動速度条件で、「ヒット試行 / 総試行数」を計算し、ヒット率を算出した。

3.2.7. 統計処理

運動方向弁別課題の弁別反応時間と、視覚運動課題における各ボール移動速度条件のヒット率の相関係数を算出し、その有意性を検定した。相関係数の有意性の検定には、数値解析ソフトウェア Matlab (2019a、Mathworks) を用いた。有意水準は $p < 0.05$ とした。

3.3. 結果

本章で用いた運動方向弁別課題によって計測される運動コヒーレンス感度は、第 2 章の考察で述べたように、モノの動きの情報（方向や速度など）を処理する運動視能を反映していることが考えられる。運動視能が視覚運動パフォーマンスにどのような影響を与えているかを検証するために、運動方向弁別課題と視覚運動課題を同一個人に対して不定期（ランダム）に実施し、両課題の成績を比較検討した。

3.3.1. 運動方向弁別課題の弁別反応時間

視力などが日ごとに、あるいは 1 日の中で、様々な要因に依存して変化する。そこで、弁別反応時間の測定間変動を調べたところ、図 3-5 の典型例が示すように、運動視能も日々変動していることが分かった。

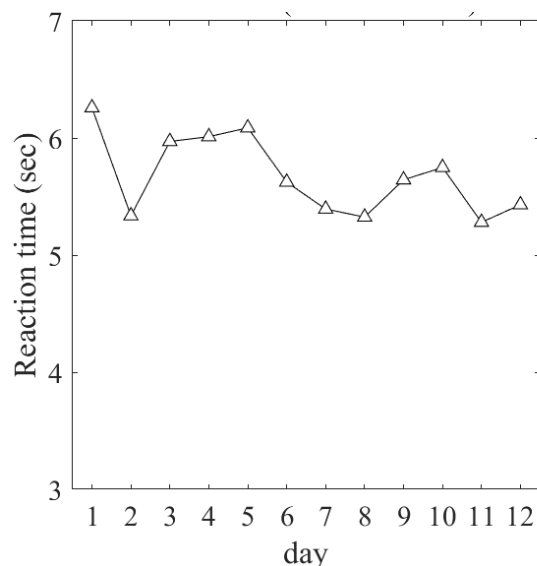


図 3-5. 運動方向弁別課題における弁別反応時間の測定間変動の典型例。

3.3.2. 視覚運動課題のヒット率

眼から得た視覚情報を運動情報へと変える視覚－運動変換能（視覚運動パフォーマンス）の計測を行なうために、視覚運動課題を実施した。ボールの移動速度が上昇するにつれ、視覚運動パフォーマンスがどのような推移をみせるのかを検討した。図 3-6 に、ある実験参加者の典型例を示す。ヒット率は高値であるほど視覚運動パフォーマンスが良かったことを示す。ヒット率はボールの移動速度の増加に伴い低下していた。特に、ボール移動速度が 4000 pixel/sec になると、顕著なヒット率の低下がみられた。そこで、本章では、実験参加者ごとにミスの発生率が急激に増加し始めるボール移動速度条件に着目し、運動方向弁別課題の弁別反応時間との関係を検討することとした。

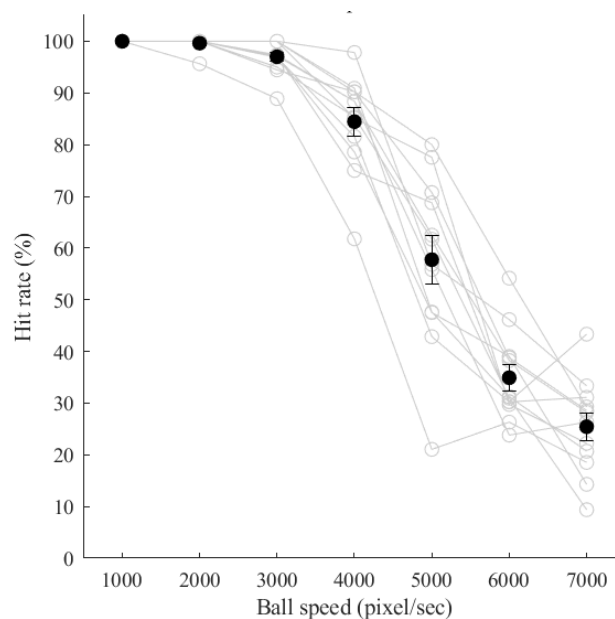


図 3-6. 視覚運動課題のボール移動速度別のヒット率の測定間変動（典型例）。黒色の丸はボール移動速度別の平均ヒット率（±標準誤差）、グレーの丸は測定ごとのヒット率を示す。

3.3.3. 運動方向弁別課題の弁別反応時間と視覚運動課題のヒット率の相関関係

本章では、運動方向弁別課題における運動方向の弁別にかかる時間（弁別反応時間）を運動視能の指標とした。そこで、運動方向弁別課題の弁別反応時間が、ヒット率の顕著な低下が観察された視覚運動パフォーマンスのヒット率（4000 もしくは 5000 pixel/sec）の関係を調べた。この関係性の典型例を図 3-7 に示す。運動方向弁別課題の弁別反応時間が早いほど、視覚運動課題のヒット率は高いという有意な相関関係が認められた（図 3-7、 $R = -0.8895$ 、 $p < 0.01$ ）。さらに、5 名の実験参加者のうち 4 名でこの関係性が認められた（図 3-8、実験参加者 A : $R = -0.789$ 、 $p < 0.01$; 実験参加者 B : $R = -0.463$ 、 $p = 0.248$; 実験参加者 C : $R = -0.8895$ 、 $p < 0.001$; 実験参加者 D : $R = -0.538$ 、 $p = 0.07$; 実験参加者 E : $R = -0.770$ 、 $p < 0.01$ ）。

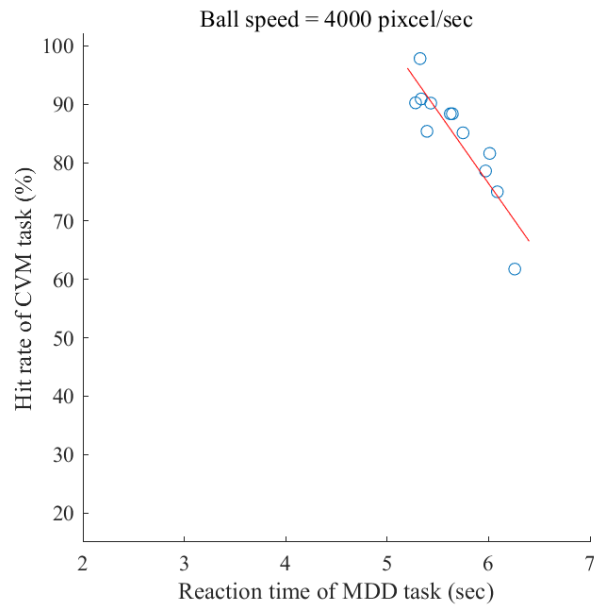


図 3-7. 運動方向弁別反応時間と視覚運動課題のヒット率の関係（典型例）。x 軸運動方向弁別課題で弁別反応時間、y 軸に視覚運動課題のボール移動速度 4000 pixel/sec 時のヒット率を示した。コヒーレンス感度が高いほど、視覚運動課題の 4000 pixel/sec 時のヒット率が高いという有意な相関関係が認められた ($R = -0.8895$ 、 $p < 0.01$)。

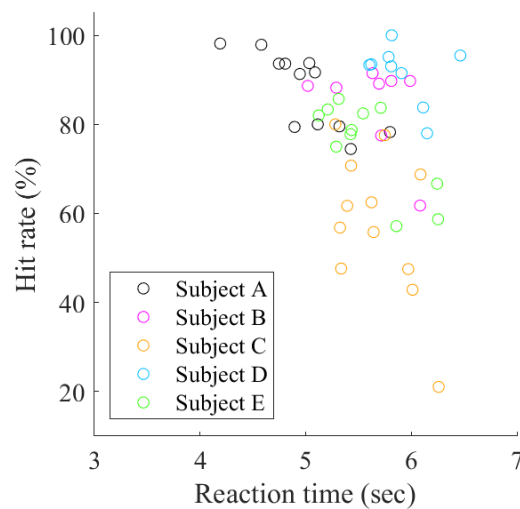


図 3-8. 運動方向弁別反応時間と視覚運動課題のヒット率の関係（Population）。x 軸に運動方向弁別課題で弁別反応時間、y 軸にミスが増加し始めた視覚運動課題のヒット率を示した（実験参加者 A : $R = -0.789$ 、 $p < 0.01$ ；実験参加者 B : $R = -0.463$ 、 $p = 0.248$ ；実験参加者 C : $R = -0.8895$ 、 $p < 0.001$ ；実験参加者 D : $R = -0.538$ 、 $p = 0.07$ ；実験参加者 E : $R = -0.770$ 、 $p < 0.01$)。

3.4. 考察

本章では、ターゲット刺激が背景ノイズ刺激の中のランダムな位置に呈示される運動方向弁別課題における実験被検者の弁別反応時間と視覚運動課題のパフォーマンス（ヒット率）の関係を検討した。5 名の実験参加者は、異なる日、異なる時間で 10 回程度の計測を行ったところ、弁別反応時間には測定間変動がみられ、また、その変動は視覚運動課題のパフォーマンスと相関していた。したがって、背景ノイズの中から運動信号を素早く検出する運動視の能力は、視覚運動パフォーマンスに貢献していることが考えられる。

3.4.1. 運動視能と視覚運動パフォーマンスの関係

本章で採用した運動方向弁別課題条件では、ディスプレイ全体に呈示される背景ノイズとしてのランダムな動きの中から、ランダムな位置に呈示されるターゲット刺激を検出し、その運動方向を弁別する必要がある。当課題遂行中、眼球運動計測を実施していないため、視線行動についての定量的なデータはないものの、実験参加者へのインタビューから、多くの場合、周辺視野領域に動きを感じることで、視線が自然にターゲット刺激へと向かい、中心視野で捉えた動きを回答することがわかっている。本課題において正答率が高いのもこのような理由によると思われる。また、弁別反応時間はいかに周辺視野で動きを感じられたかによると考えられる。そのため、第 2 章と同様に周辺視野における動きの検出が重要であると思われる。第 2 章でも述べたように、動きを検出するためには、同じ動きをするドットの局所運動信号を一つの動きとして統合するプロセスと、背景ノイズからターゲットの動きを分離するプロセスが必要である。そして、これらの神経基盤として、前者のプロセスには MT が、また、後者のプロセスには MT から入力を受ける MST が寄与すると考えられており、これらの背側視覚経路の各視覚領野の働きの違いが、視覚運動にも反映されていることが予想される。

先行研究では、視覚運動の反応速度を決めるのは、中枢神経系であること (Ando, 2001; Hulsdunker et al., 2019; Hulsdunker et al., 2017)、また、バドミントン選手の視覚運動反応時間は MT 野の知覚スピードや処理速度に依存していること (Kreegipuu and Allik, 2007) が報告されている。そのため、本研究における視覚運動パフォーマンスの変動には、背側視覚経路の情報処理の機能的変動を反映していると思われる。

本研究では、運動視能と視覚運動の関係性を調べるために、運動視能における測定間変動を利用したが、なぜ、運動視に変動が生じるのかについての理由は明らかではない。また、両者に強い相関関係が見られたものの、もし、脳の状態が運動視能および視覚運動それぞれ独立して影響を与えた場合でも、見かけの相関関係が観察され得るため、その解釈には注意を要する。しかし、実験参加者間で比較してみると、運動視能の計測値の全体的な値が低い実験参加者 E は視覚運動課題の成績も低く、逆に、実験参加者 A は両課題の成績がいずれも高いことが示されている。そのため、本研究で計測した運動方向弁別速度としての運動視能は視覚運動パフォーマンスに寄与していると考えられる。

本研究では、運動方向弁別速度と視覚運動パフォーマンスの間に強い相関関係が観察された。その大きな要因として視覚運動課題が脳の視覚情報処理を強く反映する課題となっていることが考えられる。身体運動を伴う視覚運動課題では、身体運動の発現に寄与する骨格筋の性質や状態が課題パフォーマンスに大きく寄与する。特に、指や腕など、質量を持った実際の身体の一部を連続的に動かす場合には、運動速度が増加するほど、身体に発生する慣性力が大きくなり、動作を連続させるために要する筋出力の大きさや筋疲労などの筋性要因の影響が大きくなる。力センサーへの把持力調節だけでカーソルを動かす本視覚運動課題（青山）は、これらの問題が克服されており、また、動的指標に対して反応する課題であることから、両方の課題で背側視覚経路の情報処理が関与し、強い相関が観察されたものと思われる。

第 4 章 運動方向弁別課題中の脳活動と課題成否

4.1. 背景と目的

4.1.1. 脳波研究における事象関連電位（ERP）について

これまで、ヒトの視覚刺激の運動知覚に関わる神経基盤を研究するためのツールの 1 つとして、hMT/MST 上の頭蓋位置に設置した電極から得られる“視覚刺激の動き出しによって誘発される脳波（運動開始誘発視覚電位、Motion-Onset Visual Evoked Potentials, mVEPs）”が使われてきた。脳波とは、脳から生じる電気活動を、頭皮上に設置した電極で非侵襲的に記録したものである。ただ、個々ニューロンの神経発火を記録する単一神経活動記録とは異なり、電極直下からある範囲の大脳皮質神経細胞で生じた電気活動の総和を観察するものとなる。脳波には、特定の事象発生に関わらず常に現れている自発脳波のほかに、光や音といった外部の刺激などにより現れる脳波があり、事象関連電位（Event-related potentials ; 以下、「ERP」）と呼ばれる。ERP は、自発的に発生している背景脳波に重なって現れる。ERP は背景脳波と比較して振幅が小さいため、1 回の試行から記録される脳波の形から ERP を抽出することは困難である。しかし、刺激の呈示や刺激の動き出しのタイミングに揃えて脳波を加算平均することで ERP を観察することが可能になる。これは、背景脳波が時間的にランダムで生じているのに対し、ERP は刺激呈示などのタイミングから、一定の潜時で発生するため、記録を重ね、加算平均数が多くなるほどその振幅は明確になるからである。ERP はいくつかのピークをもつ波形として現れ、それぞれのピークを成分と呼ぶ。振幅の方向がプラスであれば陽性電位（Positive）として“P”、マイナスであれば陰性電位（Negative）として“N”の頭文字がつく。その振幅が、刺激の呈示や刺激の動き出しのオンセット時間から何番目であるかを数字で示すことが多い。

4.1.2. Motion onset に関する ERP 研究

本研究が注目する視覚刺激としての動きに関する ERP 研究では、P1、N2、P3 などの代表的な脳波成分が知られている。その中で、N2 成分は、2 番目に現れるピークであり、かつ陰性電位であることを意味する。この成分は、N200 とも呼ばれ 150 msec 付近から陰性波形が発生し始め、約 200 msec 付近でピークとなり、約 300 msec までにはベースレベル値に戻ることが知られている。

先行研究では、実験参加者に RDK 刺激を見せた時の mVEPs を記録し、①N2 が誘発されること、②RDK 刺激の運動コヒーレンスと比例した N2 の振幅の変化が生じること、③運動コヒーレンスを弱くすると、N2 の最大振幅が小さくなるだけでなく、RDK 刺激の運動方向弁別精度も悪くなること、などを報告した(Niedeggen, 2002; Niedeggen, 1998, 1999)。そのため、N2 の最大振幅は視覚的な運動の信号強度を反映すると考えられる。

さらに、RDK 刺激のコントラストを低くしても N2 の最大振幅が減衰しなかったことから、N2 の最大振幅は視覚刺激の入力強度そのものではなく、視覚的な運動の信号強度を

反映していると考えられる。そこで、本研究で採用している RDK 刺激を用いた運動方向弁別課題の成否が hMT/MST から記録される mVEPs の N2 と関係するのかを検討した。なお、N2 以外の mVEPs として、P3 がオドボール課題における低頻度出現刺激に対して反応するなど認知的プロセスを反映することなどが知られているが(Kubová, 2002)、本研究では視覚的な動きの知覚プロセスに注目しているため、本研究では N2 にのみ解析を行った。

4.2.1. 実験参加者

4.2.2. 実験装置

脳波計測には、ワイヤレス生体計測装置 Polymate mini (AP108、ミユキ技研社、日本) とディスポ電極コード (AP-131、ミユキ技研社、日本)、パルテノン電極 (AP-O130(A)-15、ミユキ技研社、日本) を用いた。脳波キャップ (g.GAMMACAP2、g-tec 社、) を実験参加者に装着し、10-10 電極配置法に基づき、6 チャンネルの電極から計測した。基準電極は両乳様突起連結とし、EEG 記録電極は hMT/MST の活動を含む脳活動の波形が得られるとされている P5・P6・P7・P8・PO7・PO8 に配置した (Hulsdunker et al., 2016, 2017; Koessler et al., 2009) (図 4-1)。計測された脳波をサンプリング周波数 500Hz で A/D 変換した。

38

4.2.3. 視覚刺激のデザイン

本研究では、図 4-2 に示すように、注視点から視角半径 8° の領域にはドット刺激を呈示せず、その外側全域に RDK 刺激を呈示し、これをターゲット刺激とした。このような刺激配置とした理由は、解析に耐えうる十分な信号強度の N2 応答を得るため、また、中心視野を含む全画面に RDK 刺激を呈示することによるドットの運動方向に対する眼球運動の誘発を防止するためである。

また、N2 波形の精度は加算平均する試行数に比例するため、同一の運動コヒーレンス条件における課題の試行数を第 2・3 章で用いた課題よりも増やす必要があった。そこで、本章では、ターゲット刺激の運動コヒーレンスを $3 \cdot 20 \cdot 75\%$ に限定し、これらの刺激をランダムな順番で呈示する恒常法を採用した。

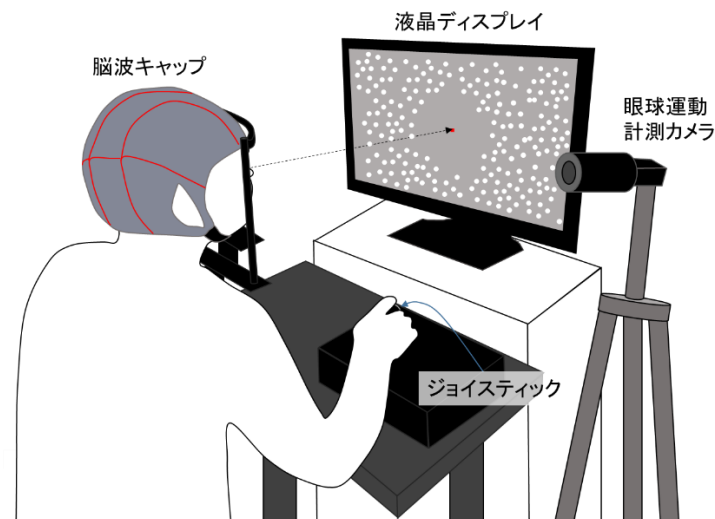


図 4-2. 実験概要図。実験参加者の頭部を液晶ディスプレイから 57 cm 離れた位置に顎台にて固定した。実験参加者には、右手でジョイスティックを握らせ、ターゲットの運動方向を弁別し、知覚した運動方向を回答させた。実験参加者が注視点を固視できているかを、液晶ディスプレイの横に設置したカメラで記録し、モニタリングした。

4.2.4. 視覚刺激

視覚刺激の生成には、Python と Psychopy を用い、机上に設置したディスプレイのウィンドウ内に白いドット刺激（直径 0.1° 、ライフタイム 180 msec (18 frame)、ドット密度 1.5 dots/deg、RGB(1,1,1)）と赤い注視点（直径 X° 、RGB(1,0,0)、 $(x, y) = (0, 0)$ ；画面中央）を呈示した。同一方向に動くドット群をターゲット刺激とした。同一方向に動くドットの割合を運動コヒーレンスと呼び、運動コヒーレンスが 100% のときはすべてのドットが同一方向に動き、運動コヒーレンスが 1% のときは 1% のドットが同一方向に動き、99% はランダム

な方向に動く。本章では運動コヒーレンスを 3・20・75 %に限定した。

注視点を画面中央に呈示し、ターゲット刺激は、注視点の半径 8°より外の全画面に呈示した（図 4-3）。ターゲット刺激の運動方向は上・下・左・右のいずれかの方向であり、試行ごとにランダムに呈示された。

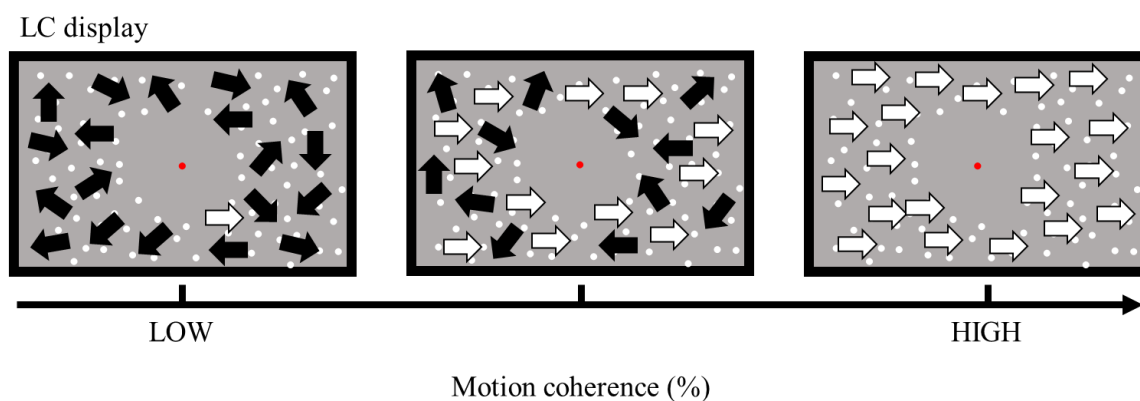


図 4-3. 視覚刺激の概要図。画面中央に注視点を設けた。ターゲット刺激は、注視点の半径 8°より外の全画面に呈示した。

4.2.5. 恒常法による運動方向弁別課題と実験手順

課題開始に先立ち、実験参加者の頭部を椅子座位姿勢にて顎台に固定した。実験参加者の任意のタイミングでジョイスティックのボタンを押すと課題が開始される。実験参加者には、注視点を固視した状態でターゲット刺激の運動方向をジョイスティック操作にて回答するように教示した。課題開始と同時に、注視点とドット刺激を呈示した。ドット刺激は静止した状態（stationary）で呈示され、1秒経つと設定された運動コヒーレンスで動き出し（矩形波様に運動コヒーレンスが増加）、その後はその運動コヒーレンスが3秒間維持された（図4-4）。ターゲット刺激は予め設定した運動コヒーレンス（ $3 \cdot 20 \cdot 75\%$ ）から試行ごとにランダムに変化した。

本章の課題では恒常法を採用した。ターゲット刺激が動き出してから静止するまでに、実験参加者が正しい運動方向を回答できた場合を正答とし、誤った運動方向を回答した場合、もしくは時間内に回答できない場合を誤答とした。実験参加者には、回答直後に異なる音による正誤のフィードバックを与えた。また、回答せずに3秒経過すると、ターゲット刺激が静止し（試行終了）、次の試行が始まる（inter trial interval は $2 \cdot 3\text{sec}$ ）。実験参加者は、課題前に、各運動コヒーレンスで24試行（運動方向(4) × 運動コヒーレンス(3) × iti(2)）ずつ練習を行ったあと、終了するまで課題を行った（144試行/課題：運動方向(4) × 運動コヒーレンス(3) × iti(2) × 3）。また、この課題を6セット実施した。

眼球運動計測のための視線のキャリブレーションを、課題の直前に実施した。

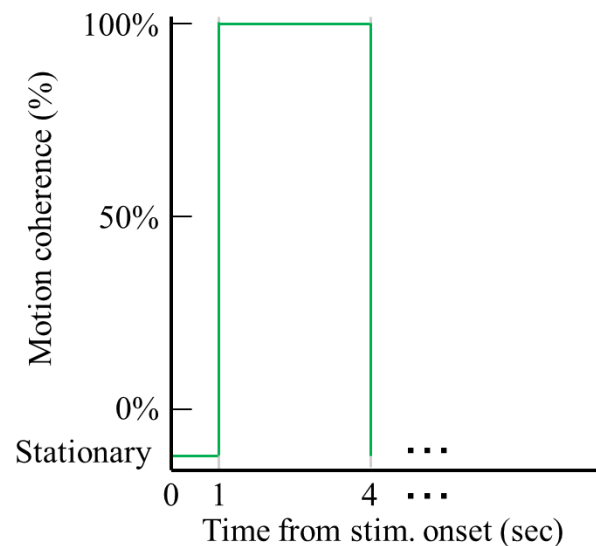


図4-4. ターゲット刺激の運動コヒーレンス増加パターン。ターゲット刺激は、静止した状態から、矩形波様に運動コヒーレンスが増加し、3秒間その運動コヒーレンスが維持される。

4.2.6. 計測と解析

運動方向弁別課題の成績（運動コヒーレンス別の正答率・反応時間）

ターゲット刺激が動き出してから静止するまでに、実験参加者が正しい運動方向を回答できた場合を正答とし、誤った運動方向を回答した場合、もしくは時間内に回答できない場合を誤答とした。運動コヒーレンスあたりの総試行数と正答数から正答率を算出した。また、正答試行において、ターゲット刺激の動き出しから実験参加者の回答（ジョイスティック操作）までの時間を反応時間とし、ターゲット刺激の運動コヒーレンスごとに反応時間を算出した。

運動開始誘発視覚電位（mVEPs）

EEGLAB を用いて、記録した EEG データに Butterworth 型デジタルフィルタ（バンドパスフィルタ、カットオフ周波数 0.5-30Hz、0-time shift）を用いて平滑化した。使用するデータはターゲット動き出しのタイミング前 200 msec から動き出しタイミング後 600 msec のデータを抽出した。ただし、脳波計測に使用した 6 チャンネルにおける $\pm 70 \mu V$ の電位を超える試行と、まばたきをした試行をアーチファクトとして、除去した。

ベースラインはターゲットの動き出しタイミング前 200 msec とした。その後、各チャンネルのデータを加算平均した。

記録電極の頭皮への設置加減や、個人の頭蓋の形の違いなどによって、得られる EEG 波形の振幅には大きな個人差があるだけでなく、同一実験参加者においても記録電極間の差が大きい。このため、6 つの記録電極から得られた EEG データのなかから、N2 が顕著に観察できた記録電極を実験参加者ごとに 1 つ選んだ。また、1 名の実験参加者の EEG データにはアーチファクトを含む多くのノイズが混入していたため、解析対象としなかった。

本研究では、mVEPs の N2 成分に着目しているため、視覚刺激呈示後 150–320 msec のデータを抽出し、陰性電位の差分を運動コヒーレンス別に算出した。

4.2.7. 統計処理

正答試行における N2 成分には、ターゲット刺激の運動コヒーレンスを要因とするフリードマン検定を行った。また、ターゲット刺激の運動コヒーレンスが 3%の時の正答時と誤答時の N2 成分を比較するためにウィルコクソン符号順位検定を行った。数値解析ソフトウェア Matlab（2019a、Mathworks）を用いた。有意水準は $p < 0.05$ とした。

4.3. 結果

4.3.1. 運動方向弁別能（正答率と反応時間）

本章では、ターゲットの運動コヒーレンスを 3・20・75%に設定し、恒常法にて運動方向弁別課題を実施した。正答率は、運動コヒーレンスが小さくなるほど低下したが、運動コヒーレンスが 20・75%のときには、ほとんど正答であった。また、反応時間は運動コヒーレンスが小さくなるほど遅延する傾向がみられた。どの実験参加者も同様な成績の推移であった（図 4-5）。

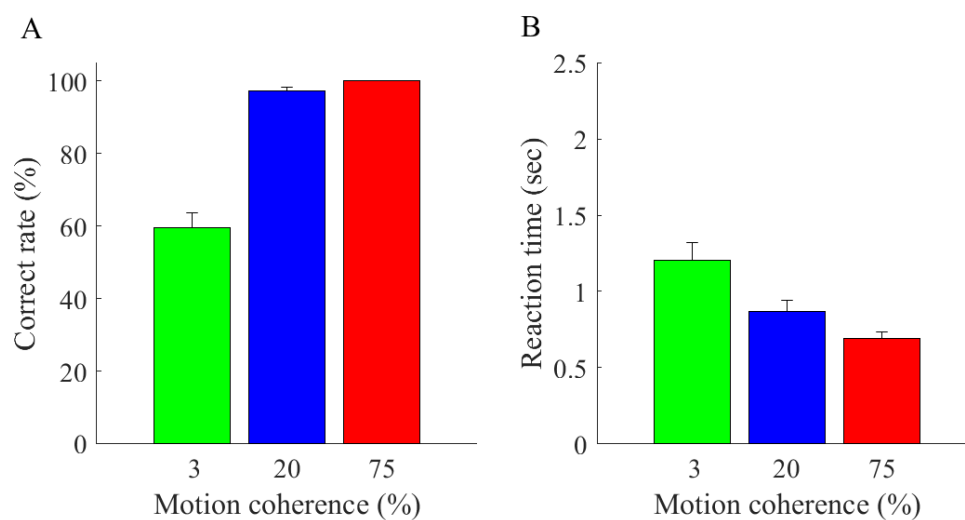


図 4-5. 運動方向弁別課題（恒常法）におけるターゲット刺激の運動コヒーレンス別の正答率（A）と反応時間（B）。

4.3.2. 運動方向弁別課題遂行中の mVEPs

図 4-6 に、全実験参加者における運動方向弁別課題遂行中の mVEPs の平均波形を示す。ターゲット刺激の運動コヒーレンスに関わらず、刺激呈示後 150 msec 付近から 320 msec まで N2 成分が観察された。N2 成分の振幅は、ターゲット刺激の運動コヒーレンスの増加に依存して大きくなっていた。同様に、運動コヒーレンスが 3% のときの正答試行と誤答試行における N2 成分の振幅を比較したところ、正答したときの N2 は、誤答時の N2 と比べて大きな振幅を示した。そこで、N2 成分についての定量的評価を行うために、刺激の動き出し前の脳波データから基準値を求め、その基準値に対する相対値の総和を算出し、統計検定を行った。その結果、ターゲット刺激の運動コヒーレンス 3% 条件と 75% 条件の間に ($p < 0.05$, 75% vs. 3%) また、3% 条件における正答試行と誤答試行の間に (図 4-7, 8, $p < 0.01$)、有意な差異が認められた。

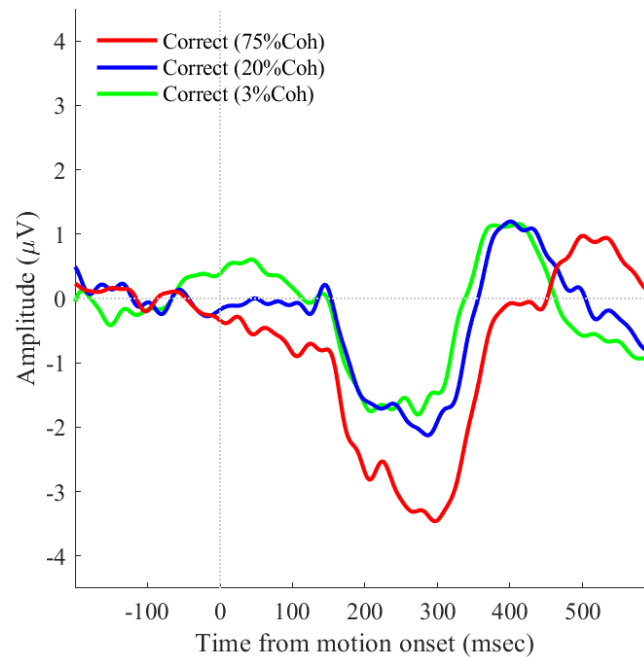


図 4-6. 全実験参加者における運動方向弁別課題遂行中の mVEPs の平均波形。ターゲット刺激の運動コヒーレンスが 75% で正解したときの波形を赤実線、ターゲット刺激の運動コヒーレンスが 20% で正解したときの波形を緑実線、ターゲット刺激の運動コヒーレンスが 3% で正解したときの波形を黒実線・誤答したときの波形を黒点線で示している (N = 8)。

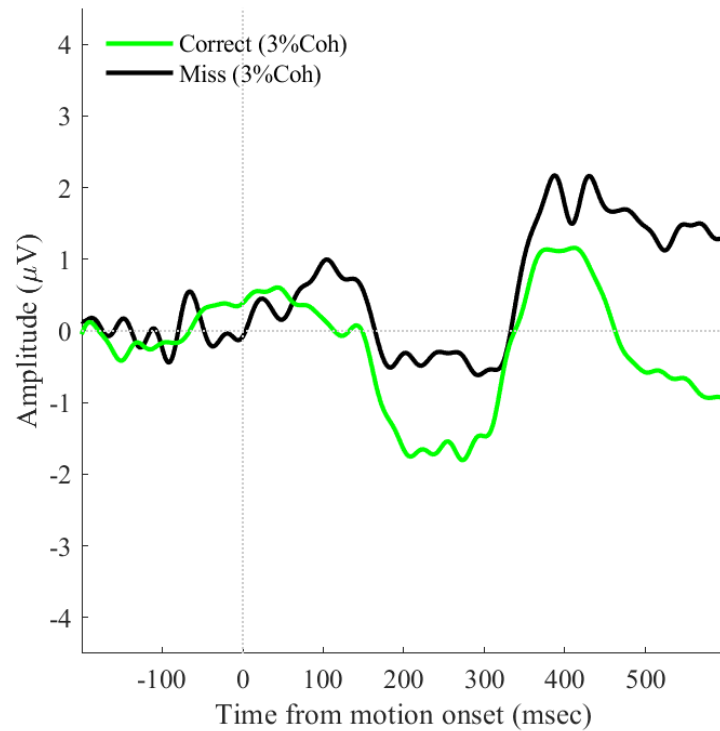


図 4-7. 運動方向弁別課題における ERP 加算平均波形 (typical data from participant AM)。ターゲット刺激の運動コヒーレンスが 3%で正解したときの波形を緑実線・誤答したときの波形を黒実線で示している (N = 8)。

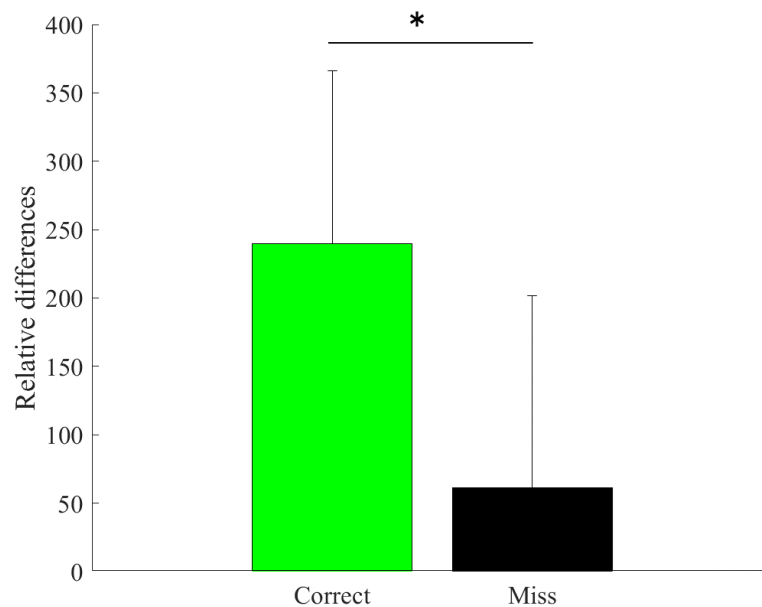


図 4-8. ターゲット刺激の運動コヒーレンスが 3%のときの、正答・誤答時の mVEPs の N2 成分の相対的な大きさ (刺激前の基準値に対する相対値の総和)。正答したときを緑、誤答したときを黒で示している。データは平均±標準誤差で示す。* $p < 0.01$ 。

4.4. 考察

本章では、運動視中枢と考えられている大脳皮質 hMT/MST からの脳波を計測するために、脳波記録用電極の装着位置を 10-10 電極配置法に基づき決定し、運動方向弁別課題遂行中の実験参加者から脳波記録を行った。その結果、ドット刺激の動き出しから約 200 msec に最大振幅に至る陰性波形 N2 が観察されること、また、N2 は刺激の運動コヒーレンスに比例して最大振幅が大きくなるとともに、課題の成否とも相関することが明らかになった。したがって、RDK 刺激による運動方向弁別課題を用いて評価される運動視能の神経基盤として MT あるいは MST の視覚反応性が重要な役割を果たしていることが考えられる。

4.4.1. mVEPs の特性

Niedeggen らは、ターゲット刺激の motion onset 後 160~200msec に N2 成分が出現し、さらに、運動コヒーレンスの増加に依存して N2 の振幅が増大することを報告している (Niedeggen, 1998, 1999)。本研究でも同様な結果が得られ、これは、視覚性運動の信号強度が N2 の振幅に反映されていることを支持する。この N2 は hMT/MST の視覚反応特性を反映していると思われ、これを支持するように、サル MT ニューロンの視覚応答強度は、運動コヒーレンスに比例して上昇する。

本研究では、N2 の振幅が単に視覚性運動の信号強度を反映しているだけでなく、課題の成否にも関係していることを見出した。このような報告は今までになく、視覚性運動に対する知覚的意思決定に N2 が寄与していることが示唆される。運動方向弁別課題遂行中のサルの MT から単一神経活動記録を行った Newsome の研究グループは、1 個の MT ニューロンの視覚応答強度が課題の成否と相関し、正答時の視覚応答は強く、また、ミスあるいは誤答時の応答は弱いことを見出している (Britten, 1992; Newsome, 1989)。そのため、本研究においても MT の視覚応答強度が課題の成否を左右する重要な要因となっていることが予想される。

第 2 章の研究では、卓球競技者の運動コヒーレンス感度は、背景ノイズあり条件の時のみ球技未経験者と比べて有意に高値を示した。そのため、視覚的運動に対する視覚反応性だけでなく、背景ノイズから視覚的運動信号を分離する能力も卓球競技者で優れていることが示唆された。このような背景の動きから特定の物体の動きの情報を分離する視覚領野として MST が知られており、自身が動くことで網膜上に生じる背景全体の流動に対しては反応せず、背景の中で動く特定の視標の動きに対してのみ反応するニューロンの存在が知られている (Saito, 1986; Tanaka, 1989a; Tanaka, 1986; Tanaka, 1989b)。このような MST ニューロンの働きが視覚性運動を手掛かりとした図地分化に寄与していると考えられ、卓球競技者は MST における機能も球技未経験者よりも優れている可能性がある。

脳波の特定成分の振幅は、電極の設置位置や状態によって容易に変化する (Kubová, 2002)。そのため、個人間で振幅長の絶対値を比較することが難しく、本章における課題では、卓球競技者と球技未経験者の比較は行っていない。しかし、より多くの実験参加者から脳波を記

録すること、正答時の波形と誤答時の波形の相対的な差異を評価することで運動経験による違いを観察できる可能性がある。これについては、今後の課題としたい。

第5章 総括

大学卓球競技者は球技未経験者と比較して、周辺視野での運動コヒーレンス感度が高く、その優位性は背景ノイズがある場合でより顕著であった。卓球場面では、プレーヤー自身が激しく動くことで、背景の網膜像は著しく変動する。球技競技者は、このような状況の中でボールや相手選手などの行動上意味のある“動きの情報”を抽出し分析する必要がある。そのため、球技競技者における背景ノイズあり条件での運動視能の優位性は、スポーツの実場面においても高いパフォーマンスの発揮に寄与していると考えられる。事実、卓球場面と類似して連続的に視覚運動を行う課題のパフォーマンスは、運動方向弁別速度と強い相関関係を示し、運動視の高低が球技パフォーマンスの高低を左右する重要な要因であると考えられる。また、運動方向弁別課題遂行中の hMT/MST の m-VEPs（刺激の動き出しに対する誘発脳波）を調査したところ、N2 成分の振幅は、ターゲット刺激の運動コヒーレンスに比例すること、また、課題の成否とも関係していることが明らかになった。そのため、運動方向弁別課題の成否には hMT/MST の視覚反応性が神経基盤として寄与していると考えられ、卓球競技者と球技未経験者の運動視能の違いは hMT/MST に原因があることが示唆される。

上記のことから、卓球競技者は視野の特定領域において優れた運動視能を有しており、これは優れた卓球パフォーマンスの発揮にも貢献し得ること、また、その運動視能の優位性は背側視覚経路（hMT/MST）の優れた情報処理機能に基づいていることが示唆された。

謝辞

本研究を遂行し学位論文にまとめるにあたり、多くのご支援とご指導を賜りました、指導教員である大阪大学全学教育推進機構七五三木聡教授には、研究テーマの設定から、論文の執筆まで終始丁寧なご助言を頂き、本論文を審査して頂きました。また研究者としての在り方、研究の面白さなど大変多くのことを学ばせて頂いたことを通して、私自身の至らなさを実感することができたことは今後の努力の糧になるものであります。心より御礼申し上げます。また、大阪大学大学院生命機能研究科大澤五住教授、田村弘准教授、大阪大学大学院医学系研究科佐藤宏道教授大阪大学大学院医学系研究科佐藤宏道教授には本論文の審査だけではなく、研究内容に関しまして丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。厚く御礼申し上げます。福岡大学スポーツ科学部檜垣靖樹教授、関西大学総合情報学部・総合情報学科荻野正樹教授には本研究に関しまして様々な技術サポートや、たくさんのご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。そして、様々なサポートをしていただいた大阪大学医学系研究科認知行動科学教室の皆様、大阪大学全学教育推進機構スポーツ脳情報科学研究室の皆様、実験参加を快く引き受けていただいた皆さまに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- Ando, S.K., N.; Oda, S. (2001). Central and peripheral visual reaction time of soccer players and nonathletes. *Percept Mot Skills* 92, 786-794.
- Bischof, W.F.R., S. L.; Wylie, D. R.; Spetch, M. L. (1999). Perception of coherent motion in random dot displays by pigeons and humans. *Percept Psychophys* 61, 1089-1101
- Britten, K.H.N., W. T.; Shadlen, M. N.; Celebrini, S.; Movshon, J. A. (1996). A relationship between behavioral choice and the visual responses of neurons in macaque MT. *Visual Neurosci* 13, 1916-1936.
- Britten, K.H.S., M. N.; Newsome, W. T.; Movshon, J. A. (1992). The analysis of visual motion a comparison of neuronal and psychophysical performance. *J Neurosci* 12, 4745-4765.
- Douglas, R.M., Neve, A., Quittenbaum, J.P., Alam, N.M., and Prusky, G.T. (2006). Perception of visual motion coherence by rats and mice. *Vision Res* 46, 2842-2847.
- Goodale, M.A., and Milner, A.D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends Neurosci* 15, 20-25.
- Hoffman, L.G.P., G.; Powell, J. (1984). The relationship of contrast sensitivity functions to sports vision. *J Am Optom Assoc* 55, 747-752.
- Hulsdunker, T., Ostermann, M., and Mierau, A. (2019). The Speed of Neural Visual Motion Perception and Processing Determines the Visuomotor Reaction Time of Young Elite Table Tennis Athletes. *Front Behav Neurosci* 13, 165.
- Hulsdunker, T., Struder, H.K., and Mierau, A. (2016). Neural Correlates of Expert Visuomotor Performance in Badminton Players. *Med Sci Sports Exerc* 48, 2125-2134.
- Hulsdunker, T., Struder, H.K., and Mierau, A. (2017). Visual Motion Processing Subserves Faster Visuomotor Reaction in Badminton Players. *Med Sci Sports Exerc* 49, 1097-1110.
- Hunfalvay, M.O., R.; Murray, N. P.; Roberts, C. (2017). Evaluation of Stereo Acuity in Professional Baseball and LPGA Athletes Compared to Non-Athletes. *Vision Development and Rehabilitation* 3, 34-42.
- Ishigaki, H.M., M. (1993). Differences in dynamic visual acuity between athletes and nonathletes. *Perceptual and Motor Skills* 77, 835-839.
- Kaneko, M., Fu, Y., and Stryker, M.P. (2017). Locomotion Induces Stimulus-Specific Response Enhancement in Adult Visual Cortex. *J Neurosci* 37, 3532-3543.
- Koessler, L., Maillard, L., Benhadid, A., Vignal, J.P., Felblinger, J., Vespignani, H., and Braun, M. (2009). Automated cortical projection of EEG sensors: anatomical correlation via the international 10-10 system. *Neuroimage* 46, 64-72.
- Kreegipuu, K., and Allik, J. (2007). Detection of motion onset and offset: reaction time and

visual evoked potential analysis. *Psychol Res* 71, 703-708.

Kubová, Z.K.J.S., J.; Chlubnová, J.; Kuba, M. (2002). Visual event-related potentials to moving stimuli: normative data. *Physiol Res* 51, 199-204.

Mann, D.L., Ho, N.Y., De Souza, N.J., Watson, D.R., and Taylor, S.J. (2007). Is optimal vision required for the successful execution of an interceptive task? *Hum Mov Sci* 26, 343-356.

Maunsell, J.H., and Cook, E.P. (2002). The role of attention in visual processing. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 357, 1063-1072.

Milner, A.D.G., M. A. (1997). *The Visual Brain in Action*.

Mizuyama, R., Soma, S., Suemastu, N., and Shimegi, S. (2016). Noradrenaline Improves Behavioral Contrast Sensitivity via the beta-Adrenergic Receptor. *PLoS One* 11, e0168455.

Muinos, M., and Ballesteros, S. (2015). Sports can protect dynamic visual acuity from aging: A study with young and older judo and karate martial arts athletes. *Atten Percept Psychophys* 77, 2061-2073.

Newsome, W.T.B., K. H.; Movshon, J. A. (1989). Neuronal correlates of a perceptual decision. *Nature* 341, 52-54.

Newsome, W.T.P., E. B. (1988). A selective impairment of motion perception following lesions of the middle temporal visual area (MT). *J Neurosci* 22, 9475-9489.

Newsome, W.T.W., R. H; Dursteler, M. R.; Mikami, A. (1985). Deficits in visual motion processing following ibotenic acid lesions of the middle temporal visual area of the macaque monkey. *J Neurosci* 5, 825-840.

Niedeggen, M.S., A.; Hesselmann, G.; Milders, M.; Blakemore, C. (2002). Is experimental motion blindness due to sensory suppression? An ERP approach. *Cognitive Brain Research* 13, 241-247.

Niedeggen, M.W., E. R. (1998). Motion evoked brain potentials parallel the consistency of coherent motion perception in humans. *Neuroscience letters* 246, 61-64.

Niedeggen, M.W., E. R. (1999). Characteristics of visual evoked potentials generated by motion coherence onset. *Cognitive Brain Research* 8, 99-105.

Palidis, D.J., Wyder-Hodge, P.A., Fookan, J., and Spering, M. (2017). Distinct eye movement patterns enhance dynamic visual acuity. *PLoS One* 12, e0172061.

Peichl, B.L., and Wassele, H. (1979). Size, scatter and coverage of ganglion cell receptive field centers in the cat retina. *Journal of Physiology* 291, 117-141.

Pilz, K.S., Miller, L., and Agnew, H.C. (2017). Motion coherence and direction discrimination in healthy aging. *J Vis* 17, 31.

Rouse, M.W.D., P.; Christian, R.; Hawley, J. (1988). A comparison study of dynamic visual acuity between athletes and nonathletes. *J Am Optom Assoc* 59, 946-950.

Saito, H.Y., M.; Tanaka, K.; Hirosaka, K.; Fukuda, Y.; Iwai, E. (1986). Integration of direction

signals of image motion in the superior temporal sulcus of the macaque monkey. *The Journal of Neuroscience* 6, 145-157

Salzman, C.D.B., K. H.; Newsome, W. T. (1990). Cortical microstimulation influences perceptual judgements of motion direction. *Nature* 346, 174-177.

Seidemann, E.N., W. T. (1999). Effect of spatial attention on the responses of area MT neurons. *J Neurophysiol* 81, 1783.

Sillero, Q.M.R., R. I.; Lorenzo, C. A.; Sampedro, M. J. (2007). Perceptual visual skills in young highly skilled basketball players. *Percept Mot Skills* 104, 547-561.

Soma, S., Suematsu, N., and Shimegi, S. (2013). Cholinesterase inhibitor, donepezil, improves visual contrast detectability in freely behaving rats. *Behav Brain Res* 256, 362-367.

Tanaka, K.F., Y.; Saito, H. (1989a). Underlying mechanisms of the response specificity of expansion/contraction and rotation cells in the dorsal part of the medial superior temporal area of the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology* 6.

Tanaka, K.H., K.; Saito, H.; Yukie M.; ukuda, Y.; Iwai, E. (1986). Analysis of local and wide-field movements in the superior temporal visual areas of macaque monkey. *The Journal of Neuroscience* 6, 134-144.

Tanaka, K.S., H. (1989b). Analysis of motion of the visual field by direction, expansion/contraction, and rotation cells clustered in the dorsal part of the medial superior temporal area of the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology* 62, 626-641.

Treue, S., and Maunsell, J.H. (1996). Attentional modulation of visual motion processing in cortical areas MT and MST. *Nature* 382, 539-541.

Tsunoda, K., Sato, A., Kurata, R., Mizuyama, R., and Shimegi, S. (2019). Caffeine improves contrast sensitivity of freely moving rats. *Physiol Behav* 199, 111-117.

Uchida, Y., Kudoh, D., Higuchi, T., Honda, M., and Kanosue, K. (2013). Dynamic visual acuity in baseball players is due to superior tracking abilities. *Med Sci Sports Exerc* 45, 319-325.

Uchida, Y., Kudoh, D., Murakami, A., Honda, M., and Kitazawa, S. (2012). Origins of superior dynamic visual acuity in baseball players: superior eye movements or superior image processing. *PLoS One* 7, e31530.

Zihl, J., von Cramon, D., and Mai, N. (1983). Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage. *Brain* 106 (Pt 2), 313-340.

Zimmerman, A.B., Lust, K.L., and Bullimore, M.A. (2011). Visual acuity and contrast sensitivity testing for sports vision. *Eye Contact Lens* 37, 153-159.

業績

・投稿論文

①Hatamoto Y, Goya R, Yamada Y, Yoshimura E, Nishimura S, Higaki Y, Tanaka H.

Effect of exercise timing on elevated postprandial glucose levels.

2017 年 8 月, Journal of Applied Physiology, 123(2):278-284

②Hatamoto Y, Takae R, Goya R, Yoshimura E, Higaki Y, Tanaka H.

Effects of different physical activity levels during a single day on energy intake, appetite, and energy balance: A preliminary study.

2019 年 3 月, Nutrients, 11(3): E690

・学会発表

【口頭発表】

①呉屋良真, 青山千紗, 檜垣靖樹, 七五三木聡

大学卓球競技者の運動視能の検討,

2017 年 9 月, 第 72 回日本体力医学会大会, 筆頭

②長江真志, 越智祐貴, 青山千紗, 呉屋良真, 荻野正樹, 七五三木聡

VR を利用した奥行き方向の動体視力トレーニング,

2017 年 9 月, 第 22 回バーチャルリアリティ学会大会, 共同

③呉屋良真, 青山千紗, 水守大河, 小見山高明, 七五三木聡

大学卓球競技者は優れた運動視能を有している,

2018 年 9 月, 第 2 回スポーツニューロサイエンス研究会, 筆頭

④水守大河, 青山千紗, 小見山高明, 呉屋良真, 七五三木聡

連続視覚運動に対する眼球運動トレーニングの効果,

2019 年 9 月, 第 74 回日本体力医学会大会, 共同

【ポスター発表】

①呉屋良真, 青山千紗, 水守大河, 小見山高明, 七五三木聡

大学卓球競技者は優れた運動視能を有している,

2018 年 9 月, 第 73 回日本体力医学会, 筆頭

②青山千紗, 呉屋良真, 小見山高明, 水守大河, 佐藤宏道, 七五三木聡

連続視覚運動時の視線行動の特性とその役割,

2018 年 9 月, 第 73 回日本体力医学会, 共同

③小見山高明, 武富大剛, 呉屋良真, 青山千紗, 七五三木聡

視知覚形成過程に対する運動の効果,

2018 年 9 月, 第 73 回日本体力医学会, 共同

④ 呉屋良真, 七五三木聡

運動視能計測法の確立と大学卓球競技者の運動視能,

2018 年 12 月, Sports Research Innovation Project 若手人材育成発表会, 筆頭

⑤ Goya R, Aoyama C, Mizumori T, Komiyama T, Shimegi S.

The table tennis players have superior motion vision in peripheral vision.,

The 1st International Sport Neuroscience Conference, 筆頭

⑥ Aoyama C, Goya R, Komiyama T, Mizumori T, Shimegi S.

The functional roles of eye movement in the continuous visuomotor actions.,

The 1st International Sport Neuroscience Conference, 共同

⑦ Komiyama T, Goya R, Aoyama C, Mizumori T, Shimegi S.

The effects of acute exercise on the formation process of visual perception.,

The 1st International Sport Neuroscience Conference, 共同

⑧ Mizumori T, Aoyama C, Goya R, Komiyama T, Shimegi S.

Effects of saccadic eye training on the continuous visuomotor performance.,

The 1st International Sport Neuroscience Conference, 共同

⑨ 呉屋良真, 青山千紗, 水守大河, 小見山高明, 七五三木聡

卓球競技者は周中心視野の運動視能が優れている,

2019 年 9 月, 第 74 回日本体力医学会大会, 筆頭

⑩ 青山千紗, 呉屋良真, 小見山高明, 水守大河, 七五三木聡

連続視覚運動時のターゲットコントラストとパフォーマンスの関係,

2019 年 9 月, 第 74 回日本体力医学会大会, 共同

⑪ 呉屋良真, 青山千紗, 小見山高明, 水守大河, 七五三木聡

卓球競技者は周中心視野における運動視能が優れている,

2019 年 11 月, 日本スポーツ心理学会 第 46 回大会, 筆頭

⑫ 青山千紗, 呉屋良真, 小見山高明, 水守大河, 七五三木聡

連続視覚運動におけるターゲット刺激のコントラストが運動パフォーマンスと眼球運動に

及ぼす影響, 2019 年 11 月, 日本スポーツ心理学会 第 46 回大会, 共同

⑬ 呉屋良真, 七五三木聡

球技競技者における運動視能の特性,

2020 年 1 月, Sports Research Innovation Project 若手人材育成発表会, 筆頭

・その他

① 日本学術振興会特別研究員 (DC2)、2018-2020 年

② 七五三木聡, 呉屋良真, 青山千紗, 小見山高明, 水守大河

体育の科学: 視覚研究へのアプローチ「スポーツ場面における視覚情報処理とアスリートの視機能計測」, 2019 年 6 月, 杏林書院, 403-409