OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	連続視覚運動パフォーマンスの変動に寄与する運動視能の特徴と神経基盤
Author(s)	髙見, 采加
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92118
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

連続視覚運動パフォーマンスの変動に寄与する運動視能の特徴と神経基盤

Characteristics and neural basis of visual motion processing ability that contribute to fluctuations in continuous visuomotor performance

髙見　采加

大阪大学大学院　生命機能研究科　生命機能専攻

スポーツ脳情報科学研究室

主査

七五三木　聡　教授

2023 年　3 月

Abstract

[Background and purpose] Athletes' performance fluctuates daily, so they do not always perform at their best. In ball sports such as table tennis, in which a ball moving at high speed is hit continuously, an athlete's brain needs to process the visual information of the ball's motion quickly and exactly, predict the arrival point, and form a motor command to direct racket there. This visual information processing is performed through the dorsal visual pathway including the area hMT+ which contributes to the perception of visual motion (motion vision). Therefore, daily fluctuations in visuomotor performance may be ascribed to fluctuations in the ability of motion vision but the relationship between the two is unclear. This study purposed to clarify whether fluctuations in continuous visuomotor performance in table tennis players are caused by fluctuations in motion vision ability, what are the characteristics of the relationship between the two, and whether area hMT+ responsivity is associated with motion vision ability.

[Methods] University table tennis players performed a motion direction discrimination (MDD) task using a random dot kinematogram and continuous visuomotor (CVM) task over 10 days as an evaluation of motion vision ability and visuomotor performance, respectively. In the CVM task, participants were asked a cursor to hit a Gabor stimulus (target) that appeared continuously and moved at high speed on a PC display. The relationship in day-to-day fluctuations between the two task performances was analyzed. Furthermore, the MDD task was performed pre, during, and post of applying tSMS on left hMT+.

[Results and discussion] The scores in the MDD and CVM tasks fluctuated daily and showed a significant and moderate correlation between the MDD task score for the visual field in which the participants captured the target in the CVM task and the CVM task score. The fluctuations in the onset latency and the endpoint position of the cursor movement approaching the target were correlated with those of the MDD task scores, suggesting that the motion vision ability is responsible for the speed and accuracy of visual information processing underlying the visuomotor performance. Moreover, these relationships were prominent in veteran players. Therefore, the functional relationship between motion vision ability and continuous visuomotor performance may be plastic and change flexibly according to visuomotor experience. In addition, applying tSMS on area hMT+ in the left hemisphere caused impairment of visual motion discriminability in the right visual field.

[Conclusion] In conclusion, for table tennis athletes, especially experienced players, fluctuations in the visual motion discriminability in a visual field specific for capturing a ball in play may be responsible for the fluctuations in continuous visuomotor (striking) performance, and may depend on the neural activity state of area hMT+.

要旨

【背景】アスリートのパフォーマンスは日々変動しており、重要な場面で必ずしもベストパフォーマンスを発揮できるとは限らない。卓球のような球技スポーツでは、高速で動くボールを連続して打つため、ボールの動きに関する視覚情報を素早く正確に処理し、ボールの到達点を予測し、そこにラケットを向ける運動指令を生成する必要がある。この視覚情報処理には脳の背側視覚経路が関与しており、視覚的な動きの知覚（運動視）の形成に寄与する hMT+野もこのプロセスに含まれている。そのため、連続視覚運動パフォーマンスの日間変動（ゆらぎ）は、運動視能の日間変動（ゆらぎ）に起因する可能性があるが、両者の関係は明らかでない。そこで本研究では、卓球選手の連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎが運動視能のゆらぎに起因しているか、両者の関係性にはどのような特徴があるか、運動視能のゆらぎの原因として hMT+野の神経活動が寄与し得るかを明らかにすることを目的とした。

【方法】大学の卓球競技者を実験参加者とした。運動視能の定量評価として、ランダムドットキネマトグラムを視覚刺激とした運動方向弁別課題（Motion Direction Discrimination task: MDD 課題）を実施した。連続視覚運動パフォーマンスの定量評価として、PC ディスプレイ上に連続的に出現して高速で動く Gabor 刺激（ターゲット）をカーソルでヒットする連続視覚運動課題（Continuous visuomotor task: CVM 課題）を実施した。同一実験参加者に対して、2 つの課題を 10 日間にわたって実施することで両課題成績の日間変動およびその関係性間を検討した。また、大脳皮質の興奮性抑制作用を有する経頭蓋静磁場刺激（transcranial static magnetic stimulation：tSMS）を左 hMT+野に与え、tSMS 刺激の介入前、介入中、介入後に MDD 課題を実施することで、hMT+野の興奮性の状態と運動視能の関係性について検討した。

【結果および考察】MDD 課題と CVM 課題の成績は日々ゆらいでおり、CVM 課題中にターゲットの動き情報をとらえていた視野の MDD 課題成績と、CVM 課題の成績には中程度の有意な正の相関が認められた。また、CVM 課題中、ターゲットをヒットするためのカーソルのアプローチ運動の開始時間および終点位置のゆらぎも、運動視能のゆらぎと中程度の有意な正の相関を示した。そのため、運動視能は、アプローチ運動の運動指令の生成時間や空間精度に影響することで、連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎに寄与すると考えられる。これらの関係性は卓球競技歴が長い参加者において顕著であることが示され、運動視と連続視覚運動の機能的関係性が可塑的であり、視覚運動経験に応じて柔軟に変化する可能性が示唆された。また、左 hMT+野に tSMS 介入を行うと、対側視野となる右視野において運動視能が低下した。

以上より、卓球選手、特に、競技歴の長い選手では、ボールを捉える視野における運動視能のゆらぎが、連続的視覚運動パフォーマンスのゆらぎに関与していること、運動視能のゆらぎは hMT+野の神経活動の状態に起因していると考えられる。

目次

第 1 章　研究背景.....6
1.1　アスリートのパフォーマンスのゆらぎ.....6
1.2　球技スポーツパフォーマンスのゆらぎと視覚機能のゆらぎ.....6
1.3　スポーツに寄与する視覚情報の処理経路.....7
1.4　hMT+野と視覚運動の関係性.....7
1.5　運動視能の定量評価.....8
1.6　連続視覚運動パフォーマンスの定量評価.....9
1.7　本研究の目的.....10
第 2 章　連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎにおける運動視能のゆらぎの寄与.....11
2.1　背景と目的.....11
2.2　方法.....11
2.2.1　実験参加者.....11
2.2.2　運動方向弁別課題（Motion Direction Discrimination task: MDD 課題）.....12
2.2.3　連続視覚運動課題（Continuous visuomotor task: CVM 課題）.....14
2.2.4　実験手順.....16
2.2.5　データ分析.....19
2.2.6　統計解析.....21
2.3　結果.....22
2.3.1　課題成績とターゲット条件との関係.....22
2.3.2　課題成績の日間変動.....22
2.3.3　MDD 課題と CVM 課題の成績におけるゆらぎの関係性.....23
2.3.4　CVM 課題における視線行動と視覚運動制御の関係性.....25
2.3.5　TAV 視野における運動視能と連続視覚運動ヒット率との関係性.....27
2.3.6　MDD 課題と CVM 課題の成績の視野特異的な相関関係と参加者の卓球競技歴.....29
2.3.7　CVM 課題の TAV 視野における運動視能と RCA の時空間特性との関係.....30
2.4　考察.....32
2.4.1　MDD 課題と CVM 課題における成績の日間変動.....32
2.4.2　MDD 課題の成績における日間変動.....33
2.4.3　CVM 課題の成績における日間変動.....34
2.4.4　運動視能と連続視覚運動パフォーマンスの関係.....34
2.4.5　アスリートにおける運動視能と視覚運動パフォーマンスの関係.....35
2.4.6　卓球競技歴が視覚情報処理と運動情報処理の機能的結合に及ぼす影響.....36
2.4.7　本研究の限界.....36

第 3 章　hMT+野に対する経頭蓋静磁場刺激の介入効果.....38
3.1　背景と目的.....38
3.2　方法.....39
3.2.1　実験参加者.....39
3.2.2　運動方向弁別課題（Motion Direction Discrimination task: MDD 課題）.....40
3.2.3　実験手順.....40
3.2.4　データ分析.....43
3.2.5　統計解析.....43
3.3　結果.....44
3.3.1　対側（右）・同側（左）視野における MDD 課題の正答率への影響.....44
3.3.2　対側（右）・同側（左）視野における反応時間への影響.....45
3.3.3　対側（右）・同側（左）視野における正答時の反応時間への影響.....47
3.4 考察.....48
3.4.1　運動方向弁別能に対する tSMS 介入の効果.....49
3.4.2　運動コヒーレンスによる tSMS 介入の効果の違い.....50
3.4.3　今後の課題.....51
第 4 章　結論.....53
謝辞.....54
参考文献.....55
業績.....68

第 1 章　研究背景

1.1　アスリートのパフォーマンスのゆらぎ

アスリートの発揮するパフォーマンスは日々変動しており、“今日は調子が良い・悪い”などの言葉で表現されることが多い。このパフォーマンスの日間変動（ゆらぎ）は、アスリートが試合などの重要な局面におけるベストパフォーマンスの発揮を妨げる大きな要因となることから、その対策はスポーツ現場における重要な課題であると言える。これまで、持久力（Hickey et al., 1992; Knaier et al., 2019a）や筋力（Bowdle et al., 2016; Knaier et al., 2019b）といった身体機能の日間・日内の変動が報告されており、身体的（生理学的）要因のゆらぎが、アスリートのパフォーマンスのゆらぎの原因として考えられ、種々の対策（指導・トレーニングなど）が身体的コンディショニングとして講じられてきた。しかし、筋系や呼吸循環系などの体力的要素はスポーツパフォーマンスを構成する一部に過ぎず、むしろ、精緻にコントロールされた運動スキルの発現・調節に関わる脳神経系機能のゆらぎの影響が考慮される必要があるが、これまでほとんど研究されてこなかった。アスリートが常に自身のベストパフォーマンスを発揮できるようなスポーツ指導・トレーニングを構築するためには、身体機能以外にパフォーマンスのゆらぎを生み出す要因を特定し、そのゆらぎを高いレベルで安定化させる必要があると言える。

1.2　球技スポーツパフォーマンスのゆらぎと視覚機能のゆらぎ

高速で動くボールを打つ卓球のような球技スポーツにおいては、ボールの動きに関する視覚情報を網膜情報として取得した後、脳内の視覚系がその視覚情報を処理することで（Hülsdünker et al., 2017; Hülsdünker et al., 2019; Hülsdünker et al., 2020）、ボールの到達地点を予測し、そこへラケットを向けるための運動指令が生成され、打球動作のパフォーマンスが出力される。そのため、視覚情報処理の質は、その後に行われる身体運動（視覚運動）の質を決定付ける重要な要素であると言え、もし、視覚情報処理能力が日間変動としてゆらいでいるのであれば、視覚運動パフォーマンスにもゆらぎとして反映される可能性がある。事実、視覚機能は変動していることが報告されている。例えば、コントラスト感度は一日の中でも変化しており、そのゆらぎは、最適な

空間周波数を含む中間の周波数帯域で最も顕著であることが示されている（Andrade et al., 2018）。したがって、視覚運動パフォーマンスのゆらぎは視覚情報処理能力のゆらぎに起因する可能性があるが、両者の関連性は明らかでない。

1.3 スポーツに寄与する視覚情報の処理経路

外界からの視覚刺激は、網膜に位置する視細胞よって神経信号へと変換され、双極細胞を経て、網膜神経節細胞から視神経を通じて脳へと情報が送られる。網膜神経節細胞からの神経信号は、視床外側膝状体を中継地点として大脳皮質一次視覚野へ送られた後に、高次視覚野へと伝達されていく。この情報処理過程は主に 2 種類の視覚情報処理経路で並列的に行われているため、並列階層的処理と呼ばれている（Goodale and Milner, 1992）。視覚経路の 1 つ目は、視覚対象の色や形、模様に関する情報を処理する腹側経路（形態視経路）であり、第一次視覚野から第二次視覚野、第四次視覚野を経て、下側頭葉へ至る。“視覚対象が何か”を認識するための役割を持つため、空間分解能が高い。そのため、スポーツにおいては、的の形に関する視覚情報（形態視情報）を高い精度で処理し、矢を的の中央へ射ることが要求とされるアーチェリーのような競技で、形態視経路の能力が重要であると考えられている。2 つ目の視覚経路は、動きの方向や速度といった視覚対象の動き情報や空間の情報を処理する背側視覚経路（運動視・空間視経路）である。“視覚対象に対して、どこに・どのように行動を起こすか”という行為に関する情報処理に関係するため、時間分解能が高く、スポーツにおいては、ボールや対戦相手などの動く視標（運動視標）に対して身体パフォーマンスの発揮が要求される球技・対人スポーツにおいて重要な役割を担うと考えられている。背側視経路には第五次視覚野 hMT+野（Middle Temporal：内側側頭視覚皮質）と呼ばれる運動視中枢が上側頭溝内部にあり、（Gold and Shadlen, 2001; Shulman et al., 2001）、そこでは視標の動きに対する高い感度と運動方向・速度に選択性を持ち、特定の運動方向・速度にのみ応答するニューロンが多く存在することが知られている（Britten et al., 1992; Britten et al., 1996; Newsome and Pare, 1988）。hMT+野（Newsome and Pare, 1988）を損傷した場合や、薬理的に hMT+野のニューロン活動を抑制した場合、運動の視知覚が損なわれることが報告されている（Newsome et al., 1985; Zihl et al., 1983）。hMT+野は、一次視覚野と同様に、対側視野に受容野を持つため、左半球の hMT+野は右視野、右半球の hMT+野は左視野を支配している。

1.4 hMT+野と視覚運動の関係性

脳波計測により得られた視覚誘発電位（visual evoked potentials：VEPs）に着目した過去の研究では、視覚刺激の運動開始から約 150-200ms の潜時の後に、hMT+野上に設置した電極から陰性電位 N2 が誘発され、これは視覚的な動きの情報処理および視知覚を反映することが報告されている（Fort et al., 2005; Hoffmann et al., 1999; Kawakami et al., 2002; Maruyama et al., 2002; Niedeggen and Wist, 1999）。例えば、卓球選手やバドミントン選手において、視覚刺激が動いたら素早くボタンを押すことを要求する視覚運動反応課題の反応速度は、N2 の潜時の短さと相関があることが報告されており（Hülsdünker et al., 2017; Hülsdünker et al., 2019）、hMT+野が視覚運動のパフォーマンスの良否に関わっていることが示唆される。これまでに、視覚運動パフォーマンスと脳波の関係を調べた一連の研究では、PC ディスプレイ上で静止していた同心円状が拡大あるいは縮小する視覚刺激や移動するボールに対して、単発的にボタンを押して反応する課題が用いられており、視覚運動パフォーマンスとしても反応時間だけが評価指標として利用されてきた（Hülsdünker et al., 2020）。しかしながら、実際の球技スポーツで行われる視覚運動において、ボールを捕球あるいは打球するためには、素早い反応（時間特性）だけでなく、腕やラケット、バットなどをいかに正確にボールへ到達させるかという空間的精度（空間特性）が重要であり、視標の動き情報（運動視）に基づく到達地点の予測精度が、身体運動の空間的精度に大きく寄与すると考えられる。そのため、視覚運動パフォーマンスに対する運動視経路の能力（運動視能）の寄与や役割を解明するためには、単なるボタン押し反応ではなく、運動視標に対して効果器を実際に到達させる視覚運動課題のパフォーマンスと運動視の関係を明らかにする必要がある。また、卓球のラリー場面のような実際の競技場面で行われる視覚運動は、単発的ではなく、ボールを連続的に打ち合う連続視覚運動であるため、連続視覚運動課題のパフォーマンスに果たす運動視の役割を明らかにする必要があるが、連続視覚運動を扱った研究は極めて少なく、運動視能との関係性も明らかでない。

1.5　運動視能の定量評価

これまで、hMT+野の機能評価法として、ランダムドットキネマトグラム（RDK）刺激を視覚刺激とした運動方向弁別課題（Motion Direction Discrimination task: MDD 課題）が用いられてきた（Muckli et al., 2003; Rees et al., 2000; Saionz et al., 2020; Vaina et al., 2001）。RDK 刺激は、無数の動くドットとして呈示され、ドット群が同一方向に動くことで、明瞭な輪郭（形）の無い動きの視覚刺激を生み出すことができる。そのため、形情報を処理する形態視経路の賦活を引き起こすことなく、運動視能のみを定量評価することが可能となる。動きについての視覚情報表現は、階層的処理過程を通して変化し、一次視覚野などの初期視覚系では空間的に制限された局所的な運動についての情報が、また、

hMT+野などの高次視覚野ではより広い視野の全体的な運動に関する情報が表現されている。RDK 刺激においては、同一方向に動くドット群の各ドットの局所的な運動が時間的かつ空間的に統合され、全体としての一貫した運動が抽出されなければ運動方向の知覚ができない。その点においても、RDK 刺激は、比較的広い視野の全体的な運動の情報表現に関わる hMT+野の機能評価として最適であると考えられている（Braddick, 1974; Newsome and Pare, 1988; Scase et al., 1996; Watamaniuk, 1993）。しかしながら、RDK 刺激によって評価される運動視能としての hMT+野の機能が、日々、どの程度ゆらいでいるのか、また、リーチングやインターセプト動作などの視覚運動パフォーマンスにどれほど寄与しているのかは明らかになっていない。特に、卓球などの連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎに、運動視能のゆらぎがどのような影響を及ぼすかについては、全く分かっていない。

1.6　連続視覚運動パフォーマンスの定量評価

卓球のような連続視覚運動におけるパフォーマンスを定量評価するためには、運動視標を連続的にインターセプトする課題が必要である。しかし、実際の卓球場面のように、ラケットを把持して素早くかつ連続的に腕を動かす状況では、ラケットを早く動かすほど大きな慣性力が発生し、これに抗うための筋力が必要になる。このような身体的要因が視覚運動パフォーマンスに及ぼす影響が大きくなるほど、脳の視覚情報処理能力の寄与は相対的に減少し、パフォーマンスとの関係が不明瞭になる。Aoyama ら（2022）はこの問題を解決すべく、コンピュータディスプレィ上において移動する動的視標を把持運動によるカーソル操作でインターセプトする連続視覚運動として行うことで、球技などの運動経験や筋力などの身体的要因を可能な限り排除した連続視覚運動課題（Continuous visuomotor task：CVM 課題）を構築した。CVM 課題では、ディスプレイの右端の様々な位置（高さ）に連続的に出現して左端へ等速直線運動で移動するターゲットを、親指と示指で把持したフォースセンサへ加える力を調節することでディスプレイ左端に呈示されるカーソルを上下に動かしてインターセプト（ヒット）する。ここでのカーソルの垂直方向の位置は、フォースセンサに入力される把持力と連動している。Aoyama ら（2022）は、CVM 課題中、ターゲットをヒットするために、ターゲットが出現してからある潜時を経て、カーソルをヒット可能な高さへ向かわせる急激なアプローチ運動 RCA（rapid cursor approach）が観察されること、連続視覚運動パフォーマンスには、RCA の発生頻度だけでなく、発生までの潜時の長さや RCA 終了時の空間的精度といったアプローチ運動の質が寄与していること、この質の高低には脳における視覚情報処理の良否が関係していることを指摘した（Aoyama et al., 2022）。そのため、この CVM 課題を用いることで、視覚情報処理能力を強く反映

した連続視覚運動パフォーマンスの評価が可能になると言える。これにより、これまで未解明であった重要問題、例えば、連続視覚運動パフォーマンスやそれに寄与すると考えられる運動視能は日々ゆらいでいるのか、ゆらいでいるとすれば、パフォーマンスのゆらぎは運動視能のゆらぎとどのような関係にあるのか、そして、連続視覚運動パフォーマンスの良否を決定づける RCA の質は、運動視能のゆらぎとどのような関係にあるのかを明らかにできると考えられる。

1.7　本研究の目的

本研究では、運動視能の定量評価法として MDD 課題を、連続視覚運動課題パフォーマンスの定量評価法として CVM 課題を用い、1）球技競技者の運動視能および連続視覚運動課題パフォーマンスは日々ゆらいでいるのか、2）もしゆらいでいるのであれば、両者のゆらぎはどのような関係にあるのか、を明らかにすることを目的とした。私はこの目的を達成するために、まず、第 1 章において、卓球競技者を対象に MDD 課題と CVM 課題をセットとして 10 日間実施し、両課題成績の関係性を検討した。さらに、第 2 章では、非侵襲的脳刺激法として近年注目されている、経頭蓋静磁場刺激（tSMS）を用いて、hMT+野の皮質興奮性を低下させる介入操作を行い、対応する視野と非対応視野の運動視能の変化を MDD 課題の成績の変化として検討した。

第 2 章　連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎにおける運動視能のゆらぎの寄与

2.1　背景と目的

アスリートが発揮するスポーツパフォーマンスは常に一定というわけではなく、日々ゆらいでおり、ベストパフォーマンスの実現は、スポーツ現場における重要課題である。これまで、スポーツパフォーマンスのゆらぎを生み出す要因として、持久力（Hickey et al., 1992; Knaier et al., 2019a）や筋力（Bowdle et al., 2016; Knaier et al., 2019b）などの身体機能が着目されており、事実、それらの機能は日々ゆらいでいることが報告されている。スポーツ現場では、パフォーマンスのゆらぎを最小限に抑え、高いレベルで安定化させるべく、身体機能を鍛えるトレーニングやコンディショニングが行われているが、未だに解決の目途は立っていない。この問題解決のためには、身体機能だけでなく、それを制御する脳情報処理のゆらぎの可能性を検証し、これを安定化させるアプローチが必要と考えられる。特に、視覚情報処理が重要な役割を果たす球技スポーツ競技においては、視覚機能の安定化が運動パフォーマンスの安定化につながる可能性が高い。

そこで第 1 章では、卓球などの球技スポーツで実行される連続視覚運動のパフォーマンスが視覚情報に強く依存していることに注目し、パフォーマンスのゆらぎの要因として脳の視覚情報処能力、特に、運動視能のゆらぎに着目した。卓球競技者を対象に、運動視能を定量評価する MDD 課題と、連続視覚運動パフォーマンスを定量評価する CVM 課題をセットとして 10 日間実施し、両課題成績のゆらぎの程度とその関係性について検討を行った。

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な 14 名（年齢 20.4±1.3 歳、卓球競技歴 8.8±2.4 年、女性 2 名、左利き 1 名）の卓球競技者が参加した。参加者の卓球競技歴とレベルは表 1 に示す通りである。全ての実験参加者に対して、実験に先立ち本研究の目的と内容に

ついての事前説明を行い、インフォームドコンセントを得た。本研究は、大阪大学研究倫理審査委員会により承認された研究計画(承認番号: L021)の研究手法および実験手続きに基づいて実施された。

表 1：実験参加者の卓球における競技歴と競技レベル

	years of experience	competition levels
sub1	8	/
sub2	9	Seven Universities Athletic Meet Singles BEST8
sub3	10	Seven Universities Athletic Meet Doubles BEST32
sub4	10	/
sub5	13	Seven Universities Athletic Meet Doubles BEST16
sub6	6	Seven Universities Athletic Meet Doubles BEST32
sub7	9	Regional competition Singles BEST 4
sub8	11	Seven Universities Athletic Meet Singles BEST4
sub9	8	/
sub10	4	/
sub11	12	Seven Universities Athletic Meet Doubles BEST32
sub12	7	/
sub13	9	Seven Universities Athletic Meet Doubles BEST32
sub14	7	/

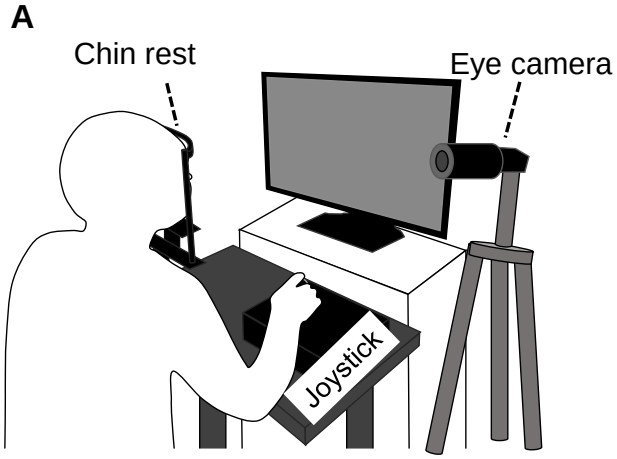
2.2.2 運動方向弁別課題（Motion Direction Discrimination task: MDD 課題）

運動視能の評価には、運動方向弁別課題（Motion Direction Discrimination task: MDD 課題）を用いた。視覚刺激は Python と Psychopy で作成し、液晶ディスプレイ（ProLite G2773HS-GB2、Iiyama 社、日本；解像度 1920×1080 pixels、リフレッシュレート 100Hz、平均背景輝度 30cd/m^2、画面サイズ 60×34°）上に呈示した。実験参加者は椅子に座り、液晶ディスプレイの中心から前方 57cm に位置する顎台（TKD-UK1、ナモト貿易社、日本）上に頭部を固定された。課題中、実験参加者は、利き手でジョイスティック（JC-AS01BK、ELECOM 社、日本）を操作して課題に回答した。課題中、USB カメラ（Grasshopper3、Point Grey 社、日本）とアイトラッキングシステム（iRecHS2、(Matsuda et al., 2017)）を用いて、500Hz で実験参加者の右眼の眼球運動を測定した（図 1A)。

MDD 課題では、視覚刺激として動くドット群（直径 0.1°、ライフタイム 180ms（18frames)、密度 1.5 dots/deg、速度 15deg/s、RGB（1, 1, 1））を液晶ディスプレイ上

に呈示した（図 1B）。視覚刺激は、ターゲット刺激と非ターゲット刺激、およびディスプレイの中央に表示される注視点で構成されていた。ターゲット刺激は、直径 8°の円形領域に同一方向に動くドット群が含まれており、ターゲット刺激領域内における全てのドットに対する同一方向に動くドットの割合を運動コヒーレンスと定義した。ターゲット刺激の運動方向は、上下左右の 4 方向のいずれかであった。注視点から右へ水平に伸びる仮想線を 0°として、注視点を中心として反時計回りに 45°，135°，225°，315°となる 4 つの方向で、かつ、注視点から視角 12°離れた 4 ヶ所のうちいずれか 1 ヶ所にターゲット刺激を呈示した。ターゲット刺激の呈示位置は、試行ごとでランダムに設定し、ターゲット刺激を除いたディスプレイ全体には、運動コヒーレンス 0%でランダム方向に動くドット刺激（非ターゲット刺激）を呈示した。

課題開始として、まず、赤色の注視点と同時にディスプレイ全体に非ターゲット刺激が呈示された（図 1C）。3 秒後に注視点の色が緑に変わり、ターゲット刺激が最大 3 秒間呈示され、その後 3 秒間ディスプレイ上のすべての刺激が消失した（ITI; intertrial interval）。実験参加者は、課題中は注視点を注視し続け、FP が緑色になったのち、弁別したターゲットの運動方向にできるだけ速くかつ正確に、利き手でジョイスティックを倒すよう指示された。実験参加者がジョイスティックを正しい方向に倒した場合を正答、間違った方向に倒したもしくは 3 秒以内に回答できなかった場合を誤答とした。実験参加者の回答直後には、正答と誤答に応じて異なる音によるフィードバックが与えられた。



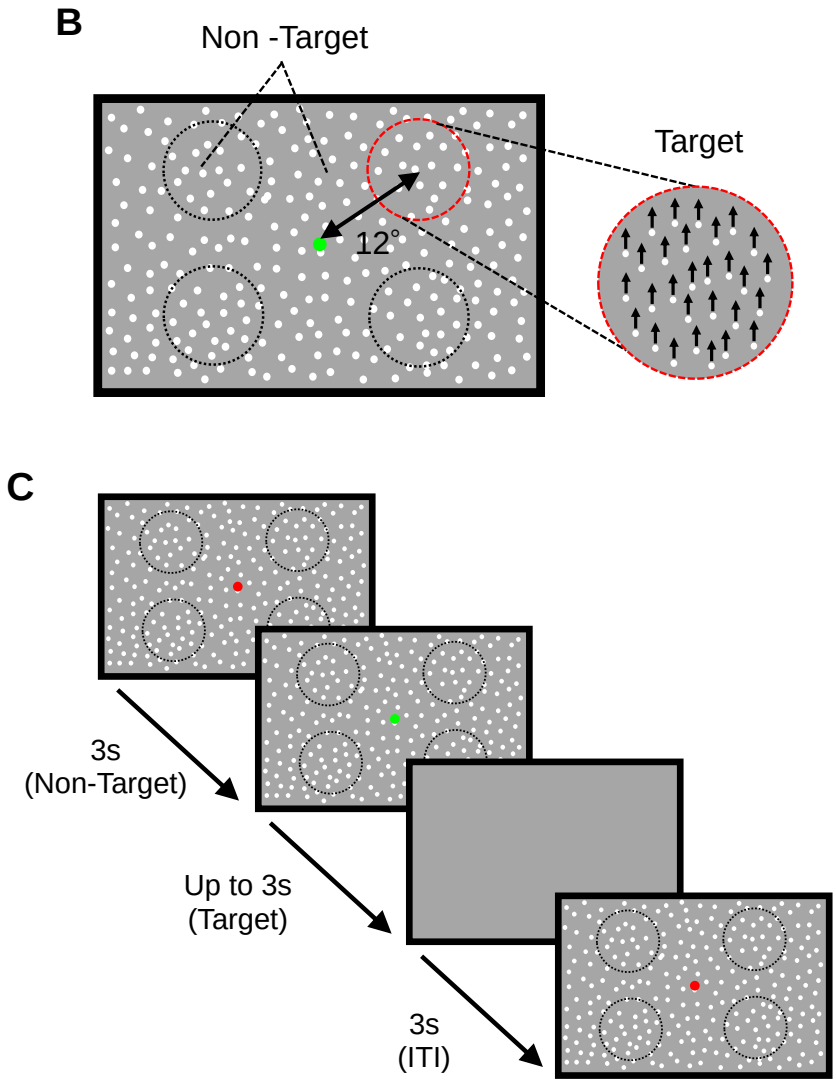


図 1：MDD 課題の概要。（A）参加者はディスプレイの前方 57cm に設置した顎台で頭部を固定し、ジョイスティックでターゲットの運動方向を回答した。課題中の右眼の眼球運動を USB カメラで記録した。（B）ターゲット領域は円（点線）であり、注視点から 12° 離れており、注視点を中心とする 4 ヶ所に呈示した。ターゲットの運動方向は上下左右のいずれかであり、この図では上向きとなる。（C）非ターゲットと赤色の注視点を 3 秒間呈示した後、注視点の色が緑に変わると同時にターゲットを最大 3 秒間呈示した。3 秒間の ITI の後、次の試行を開始した。

2.2.3　連続視覚運動課題（Continuous visuomotor task: CVM 課題）

連続視覚運動パフォーマンスの評価には、連続視覚運動課題（Continuous visuomotor

task: CVM 課題（Aoyama et al., 2022)）を用いた。視覚刺激は Python と Psychopy で作成し、MDD 課題と同様の液晶ディスプレイ上に呈示した。実験参加者はディスプレイの前方 57cm に座り、ディスプレイの X 軸方向に左側から 3 分の 1、Y 軸方向の中央の位置に設置した顎台で頭部を固定した。参加者は利き手の親指と人差し指でフォースセンサ（サンプリングレート 1KHz；USL06-H5-50N、テック技販、日本）を把持した。また、MDD 課題で使用した同一の USB カメラとアイトラッキングシステムを用いて、課題中の実験参加者の左眼の眼球運動を 500Hz で記録した（図 2A)。

CVM 課題では、視覚刺激として、ディスプレイ上に横縞のガボールパッチ（ターゲット；直径 90 pixels、空間周波数 1.5 cycles/deg、コントラスト 50%、傾き 90°）と白い長方形（カーソル；高さ 180 pixels×幅 96 pixels、RGB（1, 1, 1)）を呈示した（図 2B)。ターゲットはディスプレイの右端の様々な高さから出現し、左端へ等速直線運動で移動した。

ターゲットの速度は 1000, 2000, 3000, 4000 ,4500, 5000, 6000, 7000 pixels/s の 7 速度を設定し、それらは視角速度で 29, 57, 86, 114, 127, 144, 172, 203 deg/s に相当した。視角速度は、両眼の中点からディスプレイの右端、カーソルの左端までの 2 つのベクトルの成す角度をターゲット到達時間で割ることで算出した。ターゲットの到達時間は、ターゲットが出現してからカーソルに到達するまでの時間とし、各ターゲット速度についてそれぞれ 1563, 782, 521, 391, 347, 313, 261, 223 ms であった。課題遂行には高い集中力が必要であるため、疲労などの影響をできるだけ排除するために、すべてのターゲット速度条件において、課題時間を 30 秒に設定した。各ターゲット速度における総試行数は、それぞれ 18, 37, 54, 70, 80, 86, 103, 119 回であった。ターゲットがカーソルに当たるもしくはディスプレイの左端に到達すると同時に、ディスプレイの右端にランダムな高さで次のターゲットが出現した。カーソルはディスプレイの左端から 240 pixels の位置に呈示され、垂直方向（Y 軸方向）にのみ移動が可能であった。Y 軸上のカーソルの位置は、フォースセンサに入力される把持力の大きさと連動しており、把持力を弱める（離す）とカーソルは上へ、強める（押す）とカーソルは下へ移動した。力が入力されなければ画面最上部、最大把持力の 30%でディスプレイ最下部に位置するよう設定した。参加者は頭や腕を動かさずにカーソルでターゲットをヒットするように指示されたが、課題中、視線は自由に動かすことが可能であった。カーソルでターゲットをヒットした試行をヒット試行、ターゲットにヒットしなかった試行をミス試行と定義した。

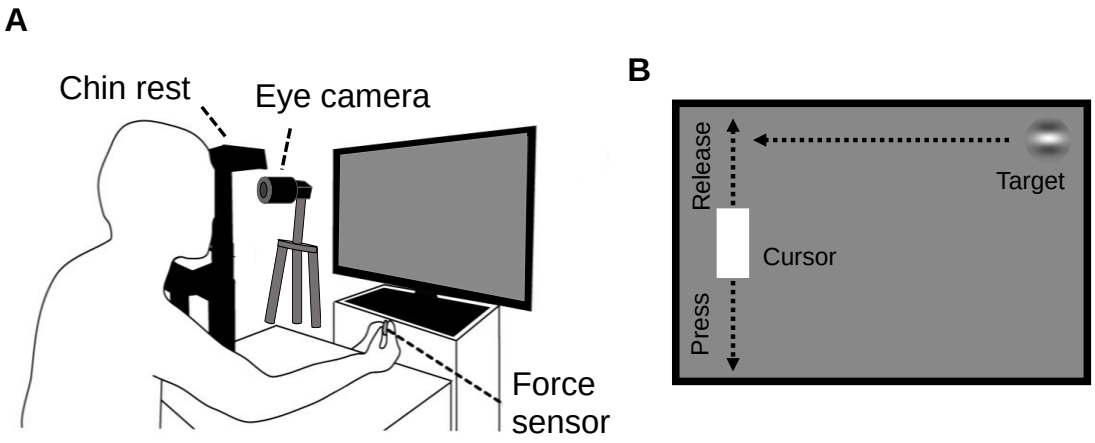


図 2：CVM 課題の概要。（A）利き手の親指と人差し指でフォースセンサを把持することを除き、実験セットアップは図 1（MDD 課題）と同じである。課題中の左眼球運動を USB カメラで記録した。（B）ターゲットは水平方向に右から左へ等速直線運動で移動した。カーソルは Y 軸方向にのみ移動し、その位置はフォースセンサに与えられる把持力と連動していた。

2.2.4　実験手順

本研究では、実験参加者は MDD 課題と CVM 課題を複数回実施したため、課題の反復による適応的な学習が課題成績に与える影響を最小限に抑える必要があった。また、MDD 課題は個人間で同じ難易度で実施することが望ましいが、運動視能には個人差があるため、参加者ごとに課題難易度を設定する必要があった。以上の理由から、本研究は、3 日間の課題習熟期間（Familiarization session）、3 日間の予備実験期間（Preliminary experimental session）、10 日間の最終実験期間（Final experimental session）の計 16 日間で構成された（図 3）。

Familiarization session では、運動コヒーレンス 80%と 20%において、全試行数に対する正答試行数の割合（正答率）がそれぞれ 100%と 75%になるまで MDD 課題を実施した。CVM 課題は、7 種類のターゲット速度（1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000 pixels/s）で、総試行数に対するヒット試行の割合（ヒット率）が 1000・2000 pixels/s で 100%、4000 pixels/s で 50%になるまで実施した。Familiarization session における 1 日あたりの課題実施時間は、MDD 課題は 1 時間、CVM 課題は 30 分であった。

Preliminary experimental session では、参加者は 9 つの運動コヒーレンス条件（1, 7, 11, 15, 19, 25, 32, 46, 100%）で MDD 課題を行った。各コヒーレンス条件の試行数は 16 回で、参加者は 1 日に全ての条件を実施した。運動コヒーレンスに対してプロットし

た 3 日間の平均正答率を、Naka-Rushton 関数（Soma et al., 2012）を用いてシグモイド曲線にフィッティングし、最大正答率と最小正答率の差を 100%とした（Rmax）。運動方向弁別が易し過ぎるもしくは難し過ぎる条件では、天井効果や床面効果が日間変動の大きさに影響を及ぼす可能性がある。そのため、このような影響を回避するために、30, 50, 70% Rmax 条件を、それぞれ C30、C50、C70 と定義し、最終的な Final experimental session で用いるコヒーレンス条件としてでテストを実施した（図 4）。Preliminary experimental session の 1 日あたりの実験時間は 30 分であった。

Final experimental session では、3 種類のコヒーレンス条件（C30, C50, C70）での MDD 課題と 4 種類のターゲット速度条件（3000, 4000, 4500, 5000 pixels/s）での CVM 課題を 1 日 2 回実施した。CVM 課題を用いた最近の研究（Aoyama et al., 2022）では、RCA は、最初に得られた視覚情報に基づいてフィードフォワード的に制御されるが、ターゲットへのサッカード眼球運動終了後に得られた新しい視覚情報によってフィードバック的に修正されることが明らかになっている。しかし、視覚フィードバック制御が行われるターゲット速度は 3000 pixels/s までであり、5000 pixels/s より高速度条件では、主にフィードフォワード制御により RCA が出現することが示されている。これは、ターゲット速度がカーソル移動のための運動制御に影響を与えることを示唆している。そこで本研究では、それらを包含する速度範囲（3000-5000pixels/s）を、Final experimental session で用いるターゲット速度として設定した。Final experimental session における 1 日あたりの課題実施時間は、両課題ともに 15 分であった。参加者全員が全てのセッションに参加し、MDD 課題の後に CVM 課題を実施した。Final experimental session では、同一参加者内で同じ時間帯（±28.9 分）に実験を実施した。参加者には、各実験日の 24 時間前からアルコールとカフェイン摂取を控えるよう指示した。

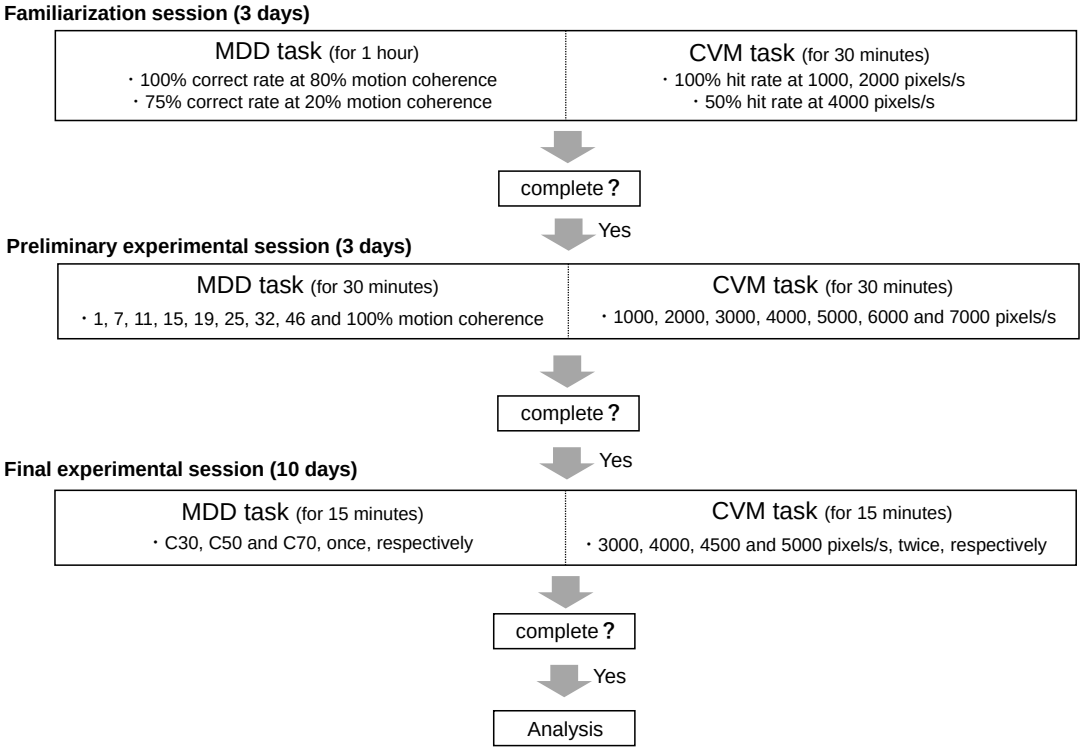


図 3：実験プロトコルの概要。本研究は、Familiarization session（3 日間）、Preliminary experimental session（3 日間）、Final experimental session（10 日間）で構成した。

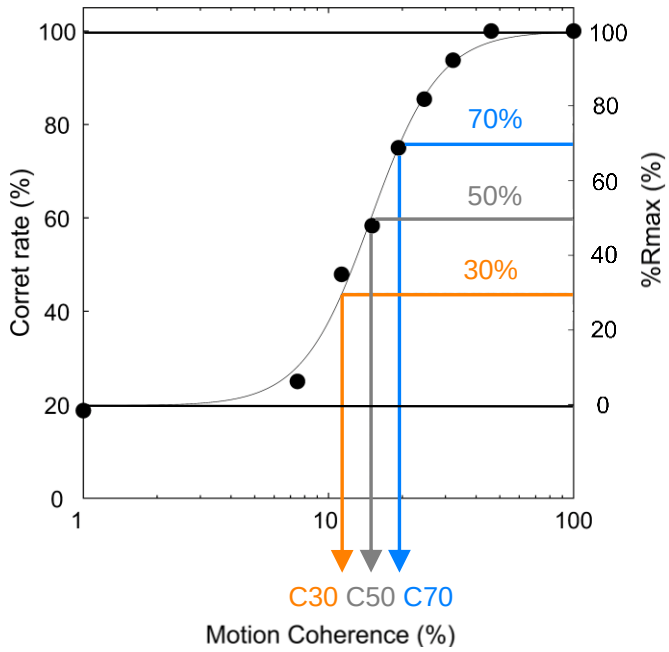


図 4：Preliminary experimental session における MDD 課題成績の典型例と Final experimental session で用いる刺激コヒーレンス値の決定方法。最大正解率と最小正解率の差を 100%（Rmax）とし、Rmax の 30、50、70%となるコヒーレンスをそれぞれ C30（オレンジ）、C50（グレー）、C70（青）と定義し、算出した。

2.2.5　データ分析

10 日間の Final experimental session における MDD 課題と CVM 課題のデータは、各実験参加者内で Z スコアを算出し、正規化した。CVM 課題の Z スコアを CVM 課題の成績（パフォーマンス）の指標とした。MDD 課題では、各測定日の正答率（正確さ）および正答試行の平均反応時間（速さ）を算出した。正答率と正答試行の平均反応時間をそれぞれ Z スコア化し、それらの平均値を各測定日ごとに算出して MDD 課題の成績（運動視能）とした。

CVM 課題では、MATLAB による 4 次の Butterworth 型デジタルフィルタ（ローパスフィルタ、カットオフ周波数 30Hz、0-time shift）を用いて、カーソル運動と眼球運動のデータを平滑化した。ターゲットとカーソルの中心間の距離が、ターゲットの半径とカーソルの垂直方向の長さの半分の合計よりも小さい Y 軸の範囲を、ヒットゾーンと定義した。計算上は、ターゲットの中心からカーソルの中心までの距離として定義されるヒットゾーンの長さは 135 pixels 以下となる。しかし、カーソルの位置と連動するフォースセンサの電気信号から高周波ノイズを除去するために行う平滑化により、

最大約 10 pixels の誤差が発生するため、その分を考慮してヒットゾーンは 145 pixels とした。

図 5 は、ある 1 試行におけるディスプレイ上の Y 軸方向のカーソルの軌跡を示したものである。課題中、参加者は、ターゲット出現からある潜時を経て、カーソルを急速にヒットゾーンへ向かわせ、ターゲットをヒットさせた。この、ヒットゾーンへの急激なカーソルのアプローチ運動を RCA（rapid cursor approach）と呼んだ。本研究では、Aoyama ら（2022）と同様の方法で、RCA に関する各パラメータを算出した。RCA 発生率は、全試行数に対する RCA の発生試行数の割合として算出した。RCA の時間的特性を評価するため、RCA の開始時間を RCA オンセット時間、終了時間を RCA オフセット時間とした（図 5）。また、RCA オフセット時のヒットゾーンとカーソルの中心間の Y 軸の絶対距離を RCA 終点位置とし、RCA の空間精度として評価した（図 5）。

さらに、Aoyama ら（2022）の基準に基づいて、以下の試行を解析対象外とした。（1）各試行の開始時にカーソルがすでにヒットゾーンにあり、RCA を必要としない試行、（2）視覚刺激の呈示から運動出力までには、少なくとも 80ms のオンセット潜時が必要であるため（Saijo et al., 2005）、RCA のオンセット時間が 80ms 未満の試行、（3）カーソルがターゲットと反対方向に動いた試行、である。CVM 課題では、連続視覚運動パフォーマンスとして、各日の全試行数に対するヒット試行数の割合（ヒット率）、RCA 発生率、全試行の RCA オンセット時間の平均値（RCA オンセット時間）、全試行の RCA 終点位置の平均値（RCA の終点位置）を算出した。CVM 課題における眼球運動は、Y 軸方向に着目して解析を行った。

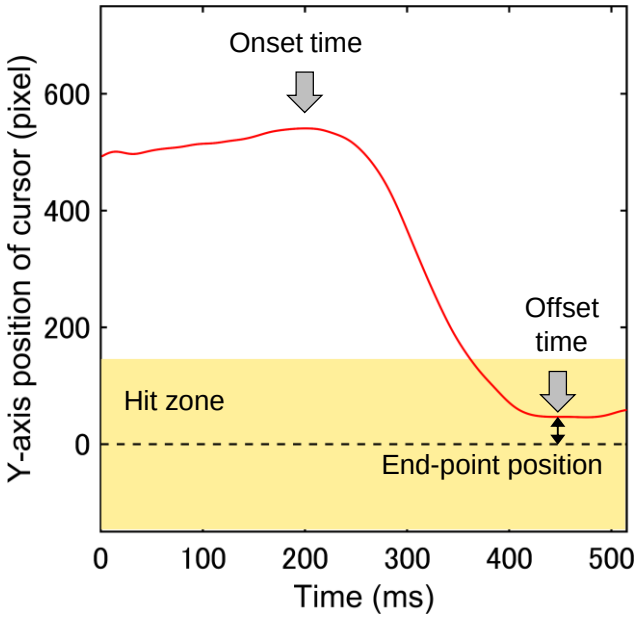


図 5：ある 1 試行の Y 軸方向のカーソルの動きを用いて 3 つのパラメータ（RCA のオンセット時間、オフセット時間、終点位置）を分析した。Y 軸の 0 値はターゲットの中心であることを示す。

2.2.6　統計解析

各課題において、ターゲット条件間の成績の差を調べるために、まず Shapiro-Wilk 検定を用いてデータの正規性を調べた。データが正規分布に従う場合には分散分析（ANOVA）を用い、非正規分布の場合は Friedman の検定を用いた。一方、各課題の 10 日間のパフォーマンスの標準偏差（SD）を日間変動値として算出し、実験条件間での差異を Bartlett の検定を用いて調べた。

CVM 課題における、ターゲット出現から RCA 開始までにターゲットを捉えていた左右視野の割合についての比較では、データが正規分布に従っていなかったため、Wilcoxon 符号順位検定を使用した。10 日間の Final experimental session で得られた MDD 課題の成績と CVM 課題のパフォーマンス（ヒット率、RCA 発生率、RCA オンセット時間、RCA 終点位置）の相関係数を算出した。データが正規分布に従う場合には Pearson の相関を、非正規分布の場合には Spearman の相関を用いて算出した。G-power を用い、相関分析の信頼性、すなわち相関係数が統計的に有意であるかどうかを調べ、すべての相関分析について信頼性を確認した。有意水準は、$p < 0.05$ とした。

2.3　結果

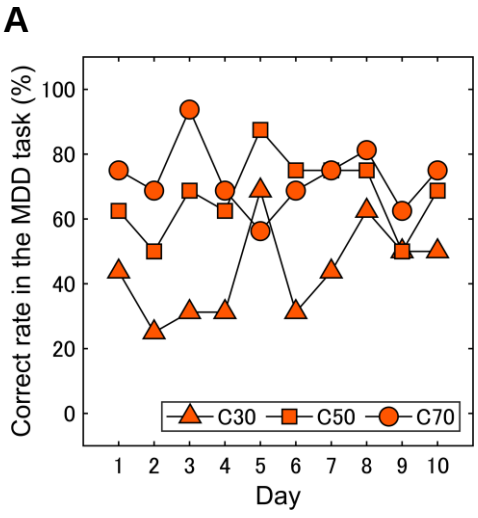
2.3.1　課題成績とターゲット条件との関係

最初に、MDD 課題と CVM 課題の各課題において、ターゲット条件の違いに対するパフォーマンス（10 日間の平均値）の違いを統計学的に検討した。MDD 課題では、コヒーレンス条件間で有意差が示された（$p < 0.001$）。また、CVM 課題では、ターゲット速度条件間でヒット率に有意な差異が認められた（$p < 0.001$）。

次に、各課題において、10 日間の標準偏差（SD）がターゲット条件の違いによって異なるのかを検討した結果、MDD 課題における正答率の分散は C30、C50、C70 の条件間で有意な差異はみられなかったが、反応時間は条件間で有意差が認められた（$p < 0.001$）。CVM 課題におけるヒット率の分散においては、ターゲット速度条件間で有意な差異が認められた（$p < 0.001$）。

2.3.2　課題成績の日間変動

MDD 課題と CVM 課題の成績は日々ゆらいでいるのか、また、ゆらいでいるとすればどの程度ゆらぐのかを検討した。図 6A-C は、ある実験参加者の MDD・CVM 課題の各条件における 10 日間の成績である。両課題の成績が日々ゆらいでおり、条件によってそのゆらぎの大きさが異なることがわかる。ゆらぎの大きさをデータの標準偏差（SD）で定量評価した結果、MDD 課題における各条件の正答率の SD は 14.4%（C30）、11.7%（C50）、10.3%（C70）、反応時間の SD は 0.2s（C30）、0.2s（C50）、0.1s（C70）であった。また、CVM 課題における各条件の SD は、5.8%（3000 pixels/s）、6.3%（4000 pixels/s）、8.3%（4500 pixels/s）、8.2%（5000 pixels/s）であった。



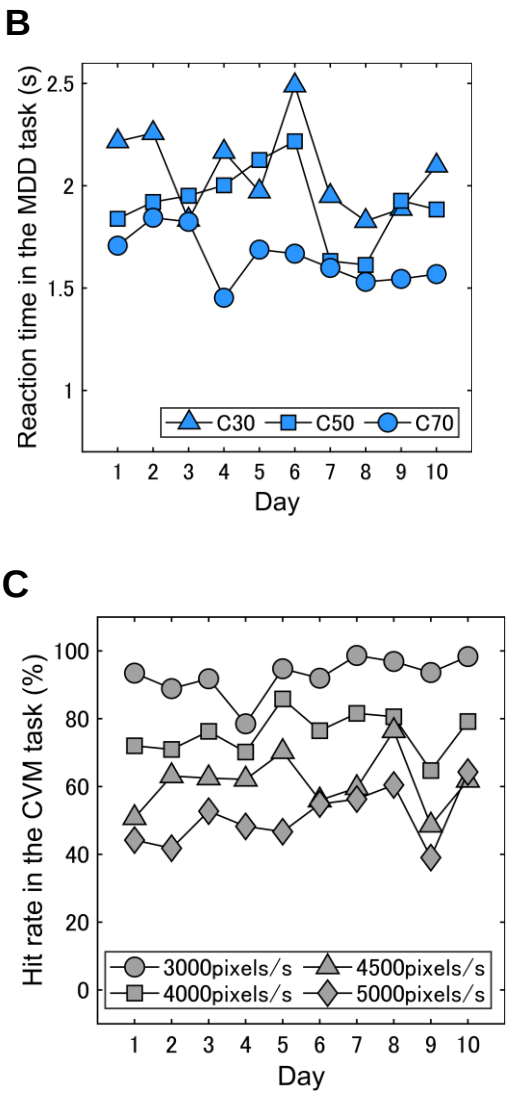


図 6：MDD 課題および CVM 課題の 10 日間にわたる成績の変化。（A）MDD 課題の正答率、（B）MDD 課題の反応時間、（C）CVM 課題のヒット率の日間変動の典型例。運動視能および連続視覚運動パフォーマンスは日々ゆらいでいた。

2.3.3　MDD 課題と CVM 課題の成績におけるゆらぎの関係性

次に、MDD 課題と CVM 課題の成績におけるゆらぎに関係性があるかどうかを検討した。MDD 課題における 3 種類のコヒーレンス条件（C30, C50, C70）と CVM 課題における 4 種類のターゲットスピード条件（3000, 4000, 4500, 5000 pixels/s）の全条件の組合せについて、MDD 課題成績と CVM 課題のヒット率のデータを散布図としてプロットし（図 7）、相関係数を求めた結果、統計的に有意で弱い正の相関関係が示された

（$r = 0.19, p < 0.001$）。この相関関係について詳細に調べるために、MDD 課題の 3 種類のコヒーレンス条件と CVM 課題の 4 種類のターゲット速度条件をそれぞれ組み合わせたデータについて相関係数を算出し、表 2A にまとめた。なお、有意水準はボンフェローニ法で補正し、5%とした。C70 と 5000 pixels/s では有意な中程度の正の相関（$r = 0.53$、$p < 0.001$）が、C30 と 4000 pixels/s（$r = 0.27$、$p < 0.05$）、C50 と 4500 pixels/s（$r = 0.27$、$p < 0.05$）では有意な弱い正の相関が示された。

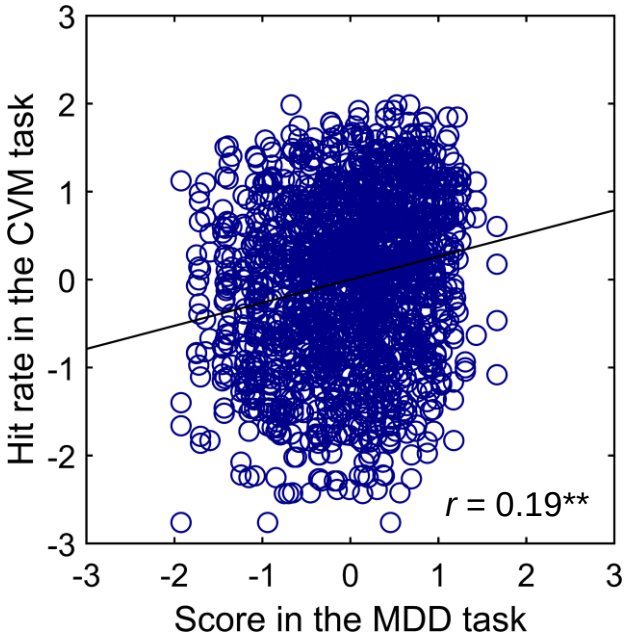


図 7：全ての実験条件を合わせた全データにおける MDD 課題成績と CVM 課題ヒット率の相関関係。** $p < 0.001$

表 2：MDD 課題と CVM 課題のターゲット条件ごとの組合せにおける成績の相関関係。（A）MDD 課題の全ての試行と CVM 課題、（B）MDD 課題において右視野にターゲットが出現した試行と CVM 課題、（C）MDD 課題において右視野にターゲットが出現した試行と CVM 課題、における成績の相関係数。* $p < 0.05$, ** $p < 0.001$

A

		CVM task (pixels/s)			
		3000	4000	4500	5000
MDD task	C70	r = .14	r = .23	r = .19	r = .53**
	C50	r = .12	r = .20	r = .27*	r = .21
	C30	r = .01	r = .27*	r = .09	r = .09

B

		CVM task (pixels/s)			
		3000	4000	4500	5000
MDD task	C70	r = .19	r = .25*	r = .15	r = .58**
	C50	r = .14	r = .16	r = .19	r = .12
	C30	r = .06	r = .22	r = .10	r = .06

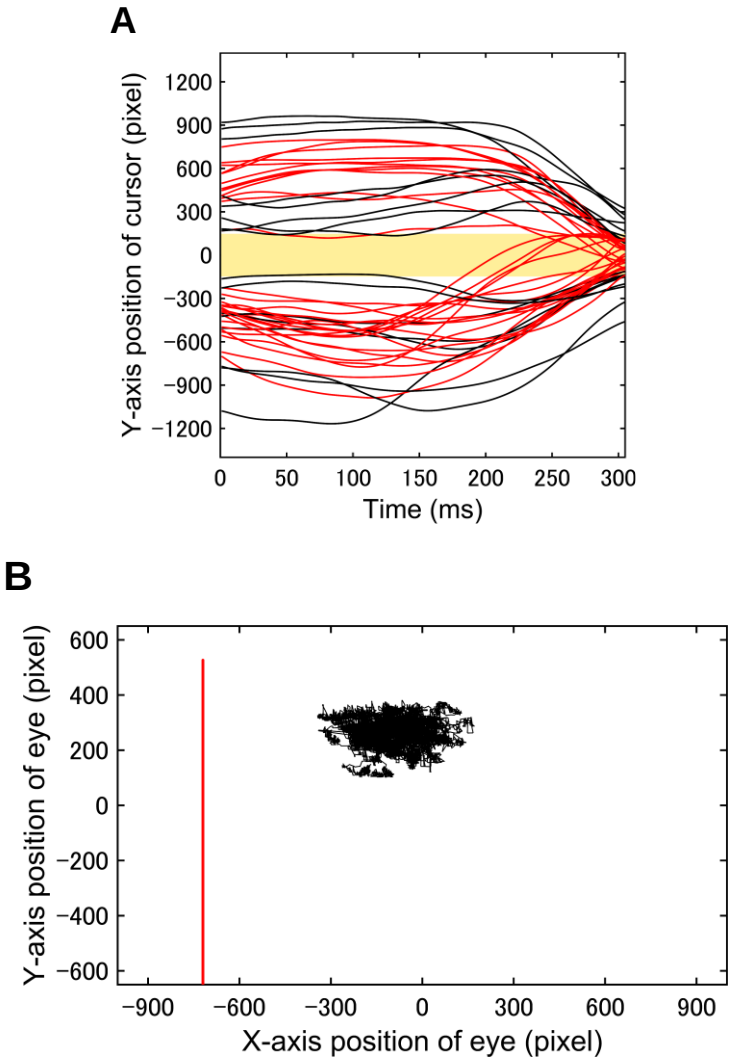
C

		CVM task (pixels/s)			
		3000	4000	4500	5000
MDD task	C70	r = .02	r = .09	r = .15	r = .21
	C50	r = .01	r = .15	r = .20	r = .20
	C30	r = -.07	r = .22	r = .04	r = .11

2.3.4　CVM 課題における視線行動と視覚運動制御の関係性

図 8A は、5000 pixels/s のターゲット速度条件下におけるディスプレイ上での Y 軸方向のカーソルの動きの時系列データの典型例である。CVM 課題では、ほとんど全ての試行において、ターゲット出現後、約 150ms 以上の潜時を経て RCA が発生した。図 8B は、課題中の液晶ディスプレイ上における視線位置を表しており、参加者の視線はディスプレイの中央付近に位置しており、ターゲットに関する視覚情報を捉えている視野に偏りがあることが示唆された。この点を確認するため、ターゲット出現から

RCA 開始までのターゲットに対する視線の水平位置を分析し、左視野と右視野のどちらでどの程度、ターゲットを捉えていたのかを調べた（図 8C）。その結果、ターゲットは参加者の視線の右側に有意に多く位置していた（左：11.9 ± 1.7%、右：88.1 ± 1.7%、Wilcoxon signed rank test, $p < 0.001$）。この結果は、CVM 課題におけるターゲットのヒットに不可欠なターゲット情報が、主に右視野から得られていたことを示唆する。



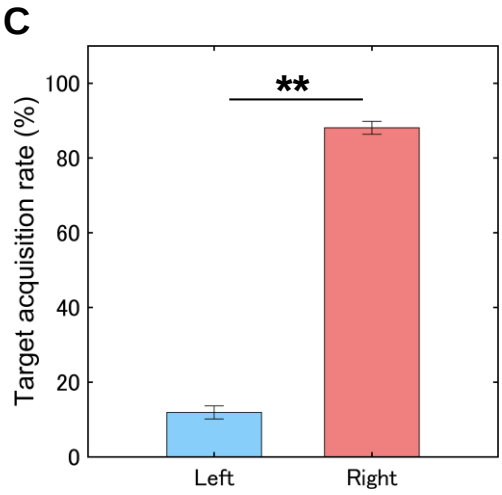


図 8：CVM 課題中のカーソル運動および眼球運動の特性。（A）ターゲット中心の Y 座標を基準にプロットされたカーソル中心の Y 軸方向の位置変化の典型例。赤線と黒線はそれぞれヒット試行とミス試行を示す。黄色の長方形部分はヒットゾーンを示す。（B）CVM 課題中の眼球運動の典型例。赤線はカーソルの動きを示す。（C）ターゲット出現から RCA オンセットまでに左右の視野でターゲットを捉えていた割合。参加者は、ターゲットの視覚情報を主に右視野から得ていた。エラーバーは標準誤差を示す。** $p < 0.001$

2.3.5　TAV 視野における運動視能と連続視覚運動ヒット率との関係性

CVM 課題におけるターゲット情報の獲得は極度に右側視野に偏っており、MT のニューロンは対側視野に受容野を持つことから（Albright and Desimone, 1987）、CVM 課題には主に左半球の hMT+野が関与していると考えられる。ここで、もし左半球の hMT+野が CVM 課題の成績に寄与しているとすれば、MDD 課題における右視野の成績は、CVM 課題の成績と、より強い相関関係を示すことが予想される。そこで、MDD 課題でターゲットが右視野と左視野に呈示された試行を分け、両課題成績の相関係数を算出した（表 2B, C）。CVM 課題では、1 名が左視野でターゲット情報を捉えていたため、CVM 課題中にターゲット情報を捉えていた半側視野を TAV 視野（target-acquired visual hemifield）と定義し、TAV 視野とその反対側の（非 TAV）視野に分けて解析した。なお、TAV 視野が左視野であった 1 名の参加者については、MDD 課題の左視野の成績と CVM 課題の成績との関係を分析した。TAV 視野では、MDD 課題における C70 と、CVM 課題における 5000 pixel/s の間にのみ有意な中程度の正の相関関係が示されたが（表 2B）、非 TAV 視野では同条件だけでなく（$r = 0.21$, *n.s.*）、いずれの条件においても有意な相関関係はみられなかった（表 2C）。図 9A, B は、TAV 視野および非 TAV 視野における MDD

課題の C70 の成績に対する CVM 課題の 5000 pixel/s のヒット率の散布図である。

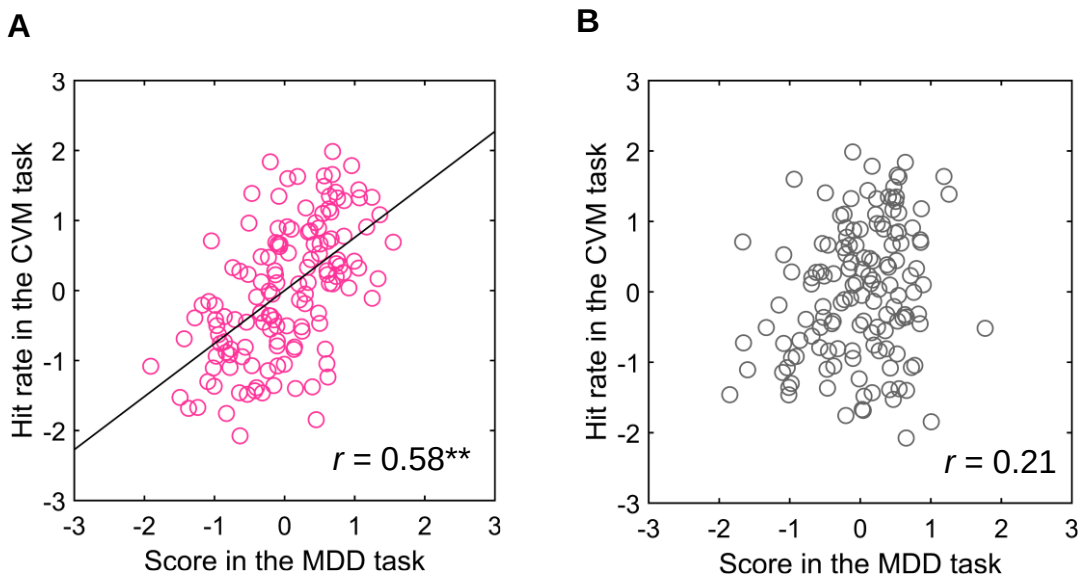


図 9：（A）TAV と（B）非 TAV 視野における MDD 課題の C70 の成績と CVM 課題の 5000pixels/s の成績の関係。** $p < 0.001$

MDD 課題と CVM 課題の両パフォーマンス間に、視野特異的な相関関係が示されたことから、RDK を用いて評価される運動視能は、動くターゲットに対する視覚運動反応のパフォーマンスを決定付ける要因の一つであることが示唆された。しかし、このように結論付けるためには、大脳半球間の非対称性を考慮する必要がある。例えば、視覚刺激に注意を向けると、右半球の hMT+野は左半球に比べて、より強い両側性を持つ（対側性の偏りが少ない）ことが報告されている（Sheremata and Silver, 2015）。注意に基づく受容野の両側化が対側（左）視野と右 hMT+野の関係性を弱めたことが、MDD 課題と CVM 課題の成績における視野特異的な相関関係をもたらした可能性が考えられる。また、CVM 課題において、ほとんどの実験参加者がフォースセンサを右手で操作し、左半球の運動野が寄与した点は考慮されるべきである。ヒトでは片側半球で生じる睡眠は知られていないものの、そのような特殊な睡眠を含め（Ramlow et al., 2019）、片側半球にのみ影響を与える何らかの要因が存在する場合、同一半球に局在する一次運動野と視覚野は、直接的な機能的つながりを持たなくても、発揮される運動機能パフォーマンスと視覚機能パフォーマンスの間には偽の相関関係が生じる可能性がある。

この可能性を調べるために、連続視覚運動パフォーマンスの評価として、ターゲットがディスプレイ上の左から右へ移動するような、従来とターゲットの運動方向が反対となる CVM 課題を、カーソルを操作する手は変更せずに実施した。その結果、この実験

条件であっても、MDD 課題と CVM 課題の成績の間に、視野特異的な有意な正の相関関係が示された（$N = 4, r = 0.45, p < 0.05$）（図 10）。この時、CVM 課題では、ターゲットは参加者の視線の左側に位置することが多く（左：96.9±0.9%、右：3.1±0.9%）、その差は統計的に有意であり（Wilcoxon signed rank test, $p < 0.001$）、全ての参加者にとって、左視野が TAV 視野であった。これらの結果は、上記の偽の相関関係の可能性を否定する証拠であるが、これに加えて、ターゲットがディスプレイ上の右から左へ移動する通常条件での CVM 課題において観察された左視野を TAV 視野とする 1 名の参加者では、MDD 課題の左視野の成績と CVM 課題の成績に、有意な中程度の正の相関関係がみられた（$r = 0.73, p < 0.05$）。また、MDD 課題の日間変動（SD）における右視野と左視野の差が視野特異性の原因である可能性を検討するために、SD 値についての比較を行ったが、正答率（右視野：14.6%、左視野：13.1%、全視野：11.0%）・反応時間（右視野：0.2s、左視野：0.2s、全視野：0.2s）ともに有意な差異は認められなかった。

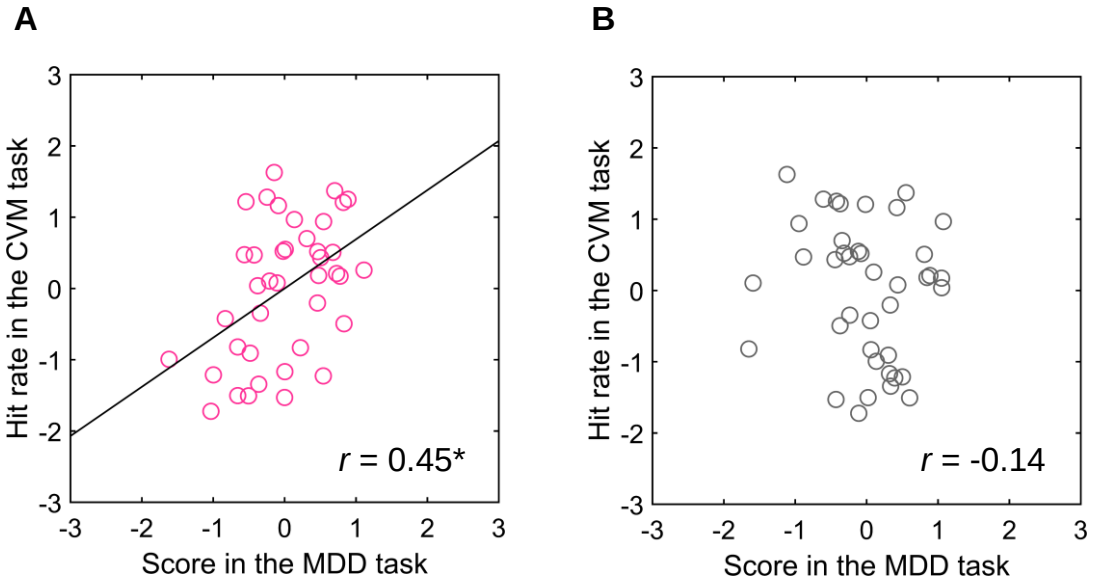


図 10：MDD 課題と CVM 課題における視野特異的な相関関係（A）TAV と（B）非 TAV 視野における MDD 課題の C70 の成績とターゲットがディスプレイ上の左から右へ移動する CVM 課題の 5000pixels/s の成績の関係。* $p < 0.05$

2.3.6　MDD 課題と CVM 課題の成績の視野特異的な相関関係と参加者の卓球競技歴

卓球選手の中でも、動きに関する視覚情報を身体の動きに変換する経験が豊富な選手

は、この 2 つの情報処理系の機能的な結びつきが強い可能性がある。そこで、MDD 課題と CVM 課題の成績の間に有意な相関があった参加者の卓球競技歴を調べたところ、競技歴が 8 年以上の参加者が多くみられた。そこで、競技歴が 8 年以上の選手（$N = 10$）と 8 年未満（$N = 4$）の選手に分け、2 つの群間でそれぞれ相関分析を行ったところ、8 年以上の競技歴を持つ参加者においてのみ、両課題間に有意な中程度の相関関係が認められ、全参加者を対象とした場合よりも強い相関係数が得られた（$r = 0.65, p < 0.001$）。一方で、競技歴が 8 年未満の参加者では、両課題間で有意な相関関係は示されなかった（$r = 0.33, p = 0.45$）。図 11A,B は、2 つのグループの、MDD 課題の C70 の成績に対する CVM 課題の 5000 pixel/s のヒット率の散布図である。両群の差は、CVM 課題のヒット率や MDD 課題の正答率および反応時間の差に起因すると考えられるが、それらのデータの平均値と分散について有意差検定を行ったところ、いずれにも有意差は認められなかった。

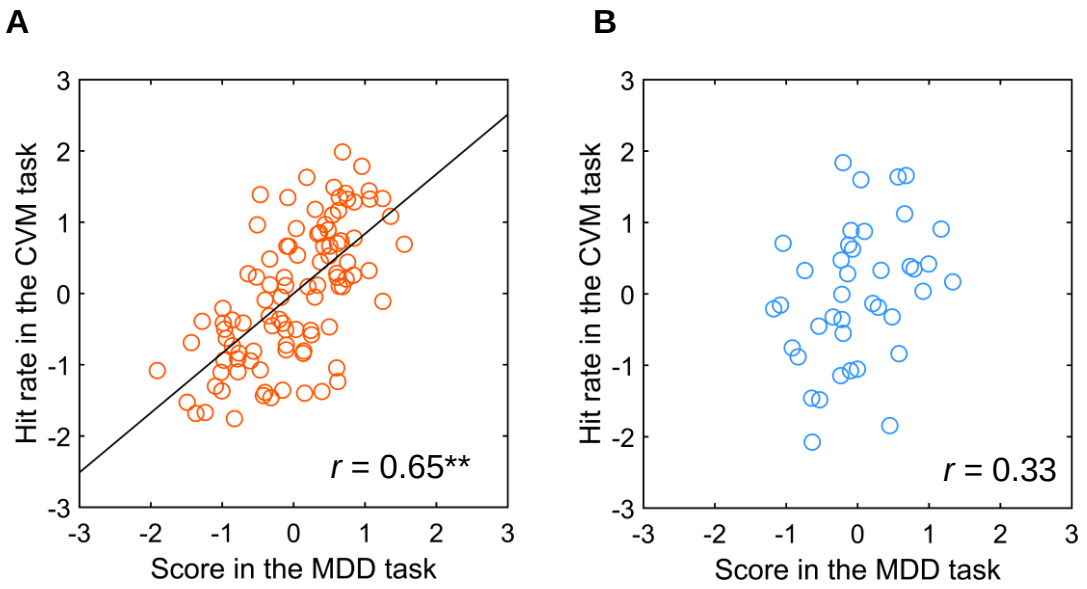


図 11：卓球競技歴が（A）8 年以上の参加者と（B）8 年未満における TAV 視野の MDD 課題の C70 の成績と CVM 課題の 5000pixels/s の成績の関係。** $p < 0.001$

2.3.7　CVM 課題の TAV 視野における運動視能と RCA の時空間特性との関係

“MDD 課題と CVM 課題のパフォーマンスは同じようにゆらいでいる”という観点から、MDD 課題の成績と、CVM 課題における RCA に関連するパラメータ（RCA 発生率、RCA オンセット時間、RCA 終点位置）との関係を調べた。全参加者において、MDD 課題の成績は、RCA オンセット時間と有意な弱い負の相関（$r = -0.32$、$p < 0.01$）、RCA

終点位置と有意な中程度の負の相関（r = -0.5、p < 0.001）を示したが、RCA 発生率との有意な相関関係は認められなかった（r = 0.05, *n*.s.）(図 12A-C)。卓球競技歴が 8 年以上の参加者においては、MDD 課題の成績は RCA のオンセット時間と有意な弱い負の相関（r = -0.4, p < 0.001）、RCA の終点位置と有意な中程度の負の相関（r = -0.61, p < 0.001）を示したが、RCA 発生率とは有意な相関関係を示さなかった（r = 0.07, *n.s.*）（図 12D-F)。一方、卓球競技歴が 8 年未満の参加者においては、RCA のオンセット時間（r = -0.05, *n.s.*）、RCA の終点位置（r = -0.15, *n.s.*）、RCA 発生率（r = -0.02, *n.s.*）の全てのパラメータと有意な相関は関係を示さなかった（図 12G-I)。

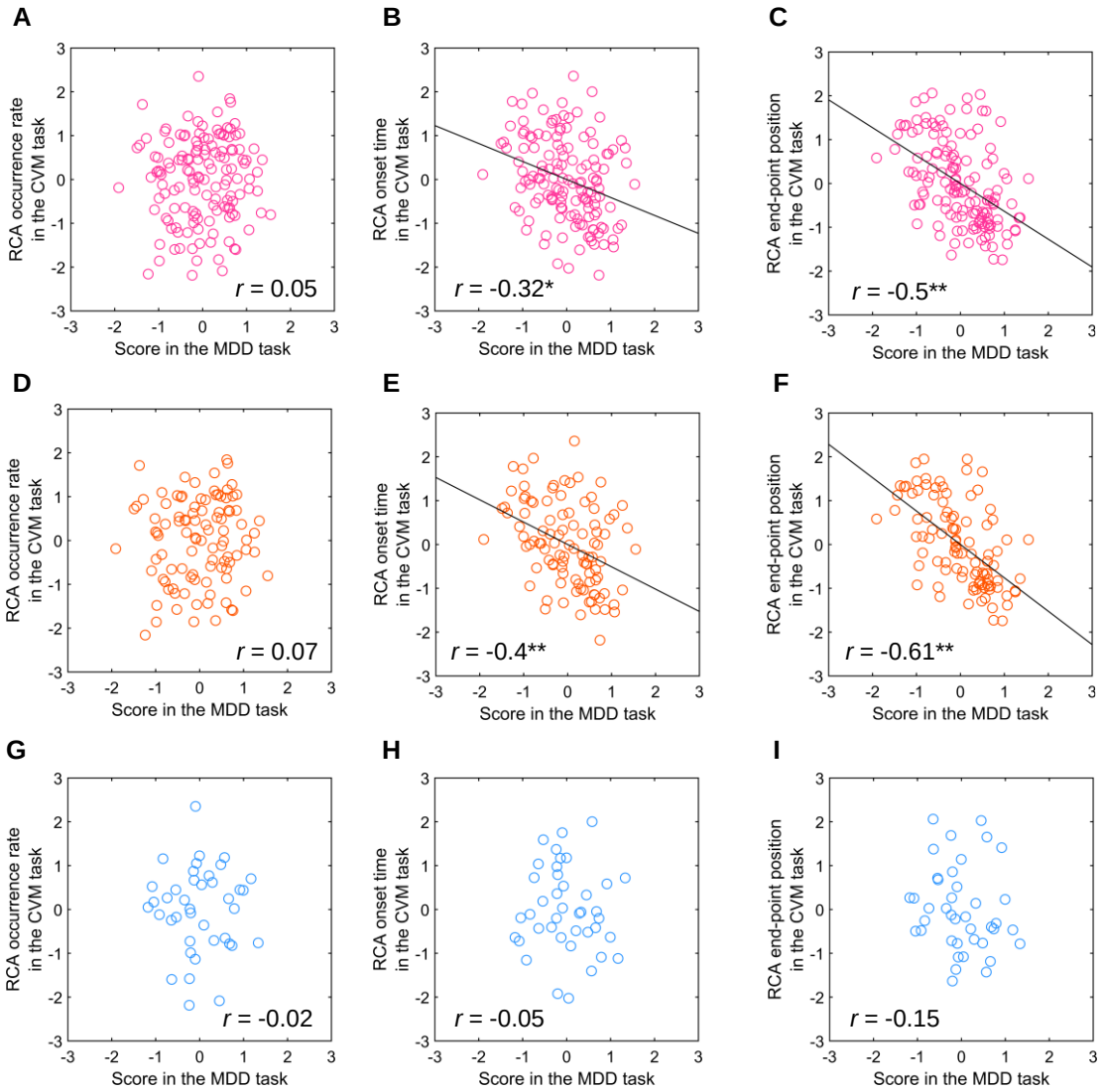


図 12：TAV 視野における MDD 課題の C70 の成績と CVM 課題の 5000pixels/s における RCA の発生率、RCA のオンセット時間、RCA 終点位置との関係。(A-C) 全ての参加者、

(D-F) 卓球競技歴 8 年以上の参加者、(G-I) 卓球競技歴 8 年未満の参加者。

2.4 考察

本章では、連続視覚運動パフォーマンス（CVM 課題のヒット率）の日間変動は運動視能（MDD 課題の成績）の日間変動に起因するのか、また、両者にはどのような関係性があるのかを大学卓球競技者を対象に検討した。主な結果は以下の通りである。(1) 運動視能と連続視覚運動パフォーマンスは日々変動していた。(2) 運動視能と連続視覚運動パフォーマンスの間には、視野特異的な有意な正の相関関係が示された。(3) この相関関係は、卓球の競技歴が長い参加者にのみ認められた。(4) 卓球の競技歴が長い参加者においては、運動視能と、連続視覚運動パフォーマンスにおける RCA のオンセット時間および終点位置との間に有意な負の相関関係が示されたが、RCA の発生率との間には示されなかった。

2.4.1 MDD 課題と CVM 課題における成績の日間変動

MDD 課題と CVM 課題の両課題成績は日々ゆらいでおり、MDD 課題における C70 と CVM 課題におけるターゲット速度 5000pixels/s の条件では、両課題成績に有意な相関関係が観察され、共変動していることが明らかになった。このように、両課題成績が共変動する理由としては覚醒水準などの脳機能全体に働く要因が考えられる。例えば、覚醒水準が高い状態では、視覚機能としての視覚刺激の検出・弁別能力が高くなるだけでなく、運動機能も高くなるため、2 つの課題成績間に擬似的な相関が生じる可能性がある。しかし、MDD 課題と CVM 課題の成績の相関関係は視野特異的に示され、両課題で、ターゲットに関する視覚情報の処理が同じ大脳半球で行われる場合にのみ、有意な相関関係が認められたことから、その可能性は低いと思われる。つまり、本研究の結果は、大脳の広領域における状態のゆらぎに起因して、実際には独立している機能間に擬似的な相関関係が見出される可能性によって説明することができない。したがって、連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎは、運動視能のゆらぎを反映していると考えられる。MDD 課題と CVM 課題における視野特異的相関関係は、脳内の視覚領域の中でも、網膜視野対応地図を有し、視覚刺激の運動方向に選択性を持つ神経細胞が存在する視覚領域が両課題成績に寄与することで、両課題成績に共変動が生じたと推測される。

両課題成績の相関関係が、MDD 課題における C70 と CVM 課題におけるターゲット速度 5000pixels/s の間でしかみられなかった理由においては、二つの観点から考察する必要があると考えられる。まず、MDD 課題における運動コヒーレンスは、視覚運動処理系への信号強度に相当し、コヒーレンスが低いと運動そのものが検出されにくくなる。

しかし、CVM 課題においては、いずれのターゲット速度においても運動方向が明確に知覚できるため、MDD 課題の高コヒーレンス条件に近く、C70 でのみ有意な相関が観察されたと考えられる。第二に、CVM 課題におけるターゲット速度について、5000 pixels/という速度は、参加者にとって非常に短時間での視覚情報処理が必要とされるため、おそらくこの処理が連続視覚運動反応のボトルネックになっていると考えられる。したがって、課題当日の、動くターゲットの情報処理過程に関する脳の状態が連続視覚運動パフォーマンスに反映されやすく、結果として、動き情報の処理を必要とする MDD 課題の成績と有意な相関関係を示した可能性がある。しかし、この点を明らかにするためには、さらなる研究が必要である。

2.4.2 MDD 課題の成績における日間変動

本研究では、視覚機能および視覚運動機能の日間変動という観点から、RDK によって評価される運動視能は、連続視覚運動パフォーマンスに寄与していることを実証した。ヒトにおける動きの視覚的知覚の中枢は、上側頭溝の後方に位置する背内側側頭葉皮質（hMT+野）である（Becker et al., 2008; Helfrich et al., 2013; Huk et al., 2002）。ヒトの磁気共鳴機能画像法（fMRI）の研究では、ターゲットが検出できた時には、検出できなかった時と比較して、頭頂皮質（Shulman et al., 2001）とともに、動きに敏感な hMT+野において、血液の酸素飽和度レベルによって MRI 信号を変化させる効果（BOLD 効果）がより大きくみられることが一貫して報告されている（Beck et al., 2001; Kranczioch et al., 2004; Marois et al., 2004）。サルの研究では、運動方向弁別課題の正答率が 50%程度となる運動コヒーレンス条件下においては、MT 野の単一ニューロンの視覚応答の大きさから課題の成否を予測できることが明らかになっている（Britten et al., 1996）。このことは、MT 野の神経応答が、運動方向弁別の知覚判断に寄与していることを強く示唆する。したがって、本研究における運動視能の日間変動は、サル MT 野の相同部位である hMT+野の活動性の日間変動を反映している可能性がある。

ここで、運動視能がなぜゆらぐのかという疑問が生じるが、これについては未だ不明である。視覚運動機能のゆらぎに影響を与える要因としては、覚醒水準や注意機能、身体的・心理社会的ストレス、情動的要因など様々なものを考慮する必要があるが（Treue and Maunsell, 1999; Vine et al., 2016）、物質的要因の関与を示す報告もある。コントラスト感度の日間変動は、最も感度の高い空間周波数に対してみられることが報告されている（Andrade et al., 2018）。興味深いことに、私たちの研究グループの最近の動物実験では、ラットの脳内のアセチルコリン、ノルアドレナリン、セロトニンなどの神経修飾物質が、Andrade らが報告した空間周波数依存性と同じようにコントラスト感度を調節することが分かっている（Mizuyama et al., 2016; Sato et al., 2020; Tsunoda et al., 2018）。したがって、脳内神経修飾物質の分泌量の日間変動は、運動視能の日間変動を引き起こす要因の一つであると考えられる。

2.4.3　CVM 課題の成績における日間変動

CVM 課題の成績が日々ゆらぐ理由を明らかにするためには、CVM 課題中のカーソル移動がどのように制御されているかを理解する必要がある。CVM 課題を用いた私たちの研究グループの最近の研究（Aoyama et al., 2022）では、RCA は、RCA 終了前にターゲットへの予測的サッカードを行った後に得られる視覚フィードバック情報によって制御されることが明らかにされた。このことは、眼球運動系の機能のゆらぎが、CVM 課題の成績のゆらぎに寄与していることを示唆している。しかし、青山ら（Aoyama et al., 2022）の研究における視覚フィードバック制御は、ターゲット速度 3000 pixesl/s といった中程度のターゲット速度でのみ観察され、5000 pixesl/s もしくはそれ以上の高速度条件においては、ターゲット出現時に得られた最初の視覚情報に基づくフィードフォワード運動制御によって、RCA を行っていることが報告されている。図 7B に示すように、本研究における参加者は、視線をターゲットに向けるためのサッカード運動をほとんど行っておらず、眼球運動自体は課題成績自体やその日間変動にほとんど寄与していないことが示唆された。つまり、ターゲット出現時に獲得した視覚情報が CVM 課題の成績に大きく寄与しており、その情報を獲得する視野の運動情報処理に寄与する初期視覚系が重要な役割を担っていると言える。したがって、MDD 課題と CVM 課題の両課題成績に、初期視覚系の機能が寄与していることが、両課題が相関関係を示した大きな要因であると考えられる。

しかし、CVM 課題の成績の統計量である分散はターゲット速度条件間で有意差があり、5000pixel/s における分散が最も大きい値を示した。したがって、このような大きな分散が、5000 pixels/s においてのみ両課題成績の間に有意な相関関係が示された理由の 1 つである可能性が考えられる。この点を明らかにするためには、さらなる研究が必要である。

2.4.4　運動視能と連続視覚運動パフォーマンスの関係

本研究では、運動視能（MDD 課題の成績）と動くターゲットに対する連続視覚運動パフォーマンス（CVM 課題の成績）が 10 日間にわたって同じようにゆらぐことを明らかにした。さらに、この関係性は視野特異的であることが示され、CVM 課題でターゲットに関する視覚情報を得た視野における MDD 課題の成績のゆらぎとの間にのみ有意な相関関係が認められた。このことは、対側視野に受容野を持ち、かつ、視覚刺激の動きに感度をもつ初期視覚野が両課題に影響を及ぼし、ゆらぎに関与していることを示唆する。この有望な候補が運動視中枢である hMT+野であり、脳内の 2 種類の視覚情報処理経路のうち、hMT+野が属する背側視覚経路は運動視だけでなく、視対象に対して行動を起こすための視覚情報処理も担っており（Goodale and Milner, 1992）、hMT+野の神経活動状態が両課題成績に反映されたと考えられる。過去の研究では、縦向きのスクリ

ーン上に表示された予測不能な曲線の軌道をたどりながら下向きに動く視覚刺激に対して、リーチングおよびインターセプトを行っている間に、hMT+野へ反復経頭蓋磁気刺激法（repetitive transcranial magnetic stimulation：rTMS）を行うと、インターセプトのタイミングと空間位置の両方が影響を受けることが明らかになっている（Dessing et al., 2013）。したがって、hMT+野は視覚運動の時間制御（Bosco et al., 2008; Field and Wann, 2004; Schenk et al., 2004）と空間制御（Dessing et al., 2013）の両方に関与している可能性がある。この仮説と一致するように、本研究の MDD 課題の成績は、CVM 課題における RCA のオンセット時間および終点位置と有意な負の相関を示した。RCA のオンセット時間および終点位置は、それぞれ視覚情報処理の速度と空間精度を反映しており、両パラメータの値が小さいほど、処理速度が速く、空間精度が高いことを示している。したがって、本研究の結果は、hMT+野の機能に関連する運動視能が視覚運動の時空間制御に寄与していることを間接的に示唆している。

アスリートの普段の日常生活における行動パフォーマンスの日間変動について明らかにした本研究では、連続視覚運動パフォーマンスの定量評価に CVM 課題を用いることで、身体的要因の影響を排除し、可能な限り神経系要因と区別することを目指した。なぜなら、この課題は空間的な身体運動を必要としないため、腕を連続的に動かす場合に生じる慣性力に抗うための筋力や筋疲労などの筋力要因の影響を低減することができるからである。しかし、MDD 課題の成績と CVM 課題の成績の相関係数は期待したほど高くなく、この結果は、両課題成績が、本実験条件において統制できていない様々な要因に影響されていることを示唆するものであった。したがって、今後の研究では、rTMS や経頭蓋直流刺激法（transcranial direct current stimulation：tDCS）などの hMT+野への直接的な介入が両課題のパフォーマンスにどのような影響を与えるかを検討する必要がある。

2.4.5　アスリートにおける運動視能と視覚運動パフォーマンスの関係

視覚運動パフォーマンスにおいて、球技選手は他者と比較して優れた能力を有しており、その優位性は主に視知覚に関連している（Hülsdünker et al., 2017; Hülsdünker et al., 2019）。RDK 刺激における同一方向へのコヒーレント運動を含む視覚刺激の動きは、後頭部および後頭側頭部において 150-200ms の潜時を経て陰性の N2 電位を誘発する（Hoffmann et al., 1999; Niedeggen and Wist, 1999）。N2 は視覚的な運動情報の知覚・処理を反映することが示唆されており（Hülsdünker et al., 2017; Hülsdünker et al., 2018; Kuba et al., 2006）、卓球選手やバドミントン選手は視覚運動の反応時間が速く、その速い視覚運動反応は、N2 の潜時の短さと相関していることが報告されている（Hülsdünker et al., 2017; Hülsdünker et al., 2019）。また、視覚刺激の動きの速度の増加によって N2 の潜時は短くなり（Maruyama et al., 2002）、結果的に刺激の動き出しに対する反応も速くなることが報告されている（Kawakami et al., 2002; Kawano et al., 1994）。本研究で用いた CVM

課題でも同様の結果が得られており、ターゲット速度が速いほど、RCA のオンセット時間が短くなることが報告されており［Supplementary 図 1（Aoyama et al., 2022）］、本研究でも同様の結果が確認された。したがって、hMT+野における視覚情報処理を反映する N2 の潜時を短くすることは、視覚運動信号の視覚情報処理を短くし、その結果、身体運動までの時間を短縮することになる。この関係は、本研究で観察された、MDD 課題の成績と CVM 課題における RCA のオンセット時間の負の相関関係を支持していると考えられる。

2.4.6　卓球競技歴が視覚情報処理と運動情報処理の機能的結合に及ぼす影響

本研究では、卓球競技歴が 8 年以上の選手にのみ、運動視能と連続視覚運動パフォーマンスの間に有意な中程度の正の相関があることが分かった（$r = 0.64$, $p < 0.001$）。特に、MDD 課題の成績と、CVM 課題の空間的精度の指標となるである RCA の終点位置との間には、有意な中程度の相関（$r = -0.58$, $p < 0.001$）が示された。実際の球技スポーツ場面において、ボールを打つためには、素早い反応だけでなく、視覚情報処理と運動情報処理のいずれにおいても空間的な精度が求められる。したがって、視覚情報に基づく視覚運動の経験の蓄積が、視覚情報処理と運動情報処理の機能的な結合を強めていると推測できる。実際に、長期的なトレーニングによる運動技能の学習は、脳の構造的な可塑的変化と関係しているということが、いくつかの研究で一貫して報告されている（Draganski et al., 2004; Draganski et al., 2006; Hyde et al., 2009; Kleim et al., 1996; Scholz et al., 2009; Taubert et al., 2010）。

脳体積解析手法（voxel-based morphometry, VBM）を用いた研究では、ジャグリング経験のない健常成人がトレーニングを行うと、頭頂葉と視覚野の中側頭付近の灰白質が増加することが明らかにされている（Draganski et al., 2004）。同様に、ゴルフにおいても、トレーニング強度が高いと灰白質が増加することが明らかにされている（Bezzola et al., 2011）。しかし、灰白質の増加はゴルフの成績変化とは相関関係を示さなかったため、入力の量、つまり、トレーニングによって、特定の神経回路が頻繁に使われることを反映しているに過ぎないのかもしれない。したがって、視覚情報処理と運動情報処理との機能的結合を強化することは、神経回路の短期的な機能変化よりも、脳の構造的な可塑的変化を反映している可能性がある。

2.4.7　本研究の限界

本研究では、運動視能の日間変動が連続視覚運動パフォーマンスの日間変動に寄与している可能性を見出した。しかし、これらの日間変動の原因は不明である。視覚運動には、覚醒水準や注意機能、身体的・心理社会的ストレス、情動的要因など様々な要因が影響すると考えられる（Treue and Maunsell, 1999; Vine et al., 2016）。変動の要因は、参加者ごとに異なる可能性があるため、今後、これらの生理指標を用いて視覚情報処理と視

覚運動情報処理との関連を検討する必要があると考えられる。また、運動視能と連続視覚運動パフォーマンスの直接的な関係に対する rTMS、tDCS、tSMS（経頭蓋静磁場刺激）の効果についても検討する必要がある（Antal et al., 2004）。

第 3 章　hMT+野に対する経頭蓋静磁場刺激の介入効果

3.1　背景と目的

第 1 章において、連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎには運動視能のゆらぎが起因している可能性が示唆された。これは、運動視能が連続視覚運動パフォーマンスを決定する要因となり得ること、すなわち、高いレベルの連続視覚運動パフォーマンスの発揮には、高いレベルでの運動視能の安定化が不可欠であることを意味する。そのため、運動視能のゆらぎの原因についての理解が必要となるが、その神経基盤はよく分かっていない。視覚的な動きの知覚には背側視覚経路に位置する高次視覚領野としての hMT+野が必須であることが分かっているため、hMT+野の神経活動状態の変化が運動視能のゆらぎとして反映されている可能性がある。そこで本研究では、局所的かつ非侵襲的に脳状態を修飾することができる経頭蓋静磁場刺激（tSMS）を用いて、hMT+野に介入操作を行った際の運動視能の変化について検討した。

tSMS とは、2011 年に Oliviero ら（Oliviero et al., 2011）によって開発された新しい非侵襲的脳刺激法（noninvasive brain stimulation：NIBS）であり、刺激直下の大脳皮質の興奮性を抑制させる作用がある。これまでのヒトの脳の刺激手法としては、反復経頭蓋磁気刺激法（repetitive transcranial magnetic stimulation：rTMS）や経頭蓋直流電流刺激法（transcranial direct current stimulation：tDCS）が広く用いられてきたが、これらの手法にはいくつかの欠点がある。1 点目は安全性である。磁場の発生により、頭蓋内に電流を発生させることで神経細胞を直接発火する rTMS では、てんかん、頭痛、めまい、頭皮の痛みなどを引き起こす危険がある（Bae et al., 2007; Morales et al., 2005; Wassermann, 1998; Wassermann et al., 1999; Zis et al., 2020）。また、頭蓋内に直流電流を流す tDCS についても、火傷や、頭皮の痛みやかゆみといった不快感などの副作用が報告されている（Nitsche et al., 2003）。2 点目は経済性および簡易性であり、rTMS や tDCS は介入時に電流を流すための高価な機器が必要である。これに対して、特殊な機器を必要とせず、刺激脳部位直上に小型のネオジウム磁石を接触させるだけで脳機能を刺激することができる tSMS は、これらの欠点を全て克服しており、安全性、経済性、操作性に優れた NIBS として、近年着目され始めている（Oliviero et al., 2015）。

tSMS はこれまでに、様々な脳領域において、その効果が実証されてきた。運動野に tSMS 刺激を行うと TMS によって生じる運動誘発電位が低下すること（Dileone et al., 2018; Nojima et al., 2015; Oliviero et al., 2011; Silbert et al., 2013; Takamatsu et al., 2021）、体性感覚野においても感覚誘発電位の振幅が減少すること（Kirimoto et al., 2014; Kirimoto

et al., 2016)、聴覚野への刺激により聴力が低下すること（Heimrath et al., 2020）が報告されている。また、視覚系を対象とした研究では、高い静磁場により、外側膝状体の自然発火（Rosen and Lubowsky, 1990）や、一次視覚野から生じる視覚誘発電位（Rosen and Lubowsky, 1987）が抑制されることが報告されている。さらに、視覚系に対する tSMS 刺激の影響は、神経反応だけでなく行動成績にも表れる。これまで、一次視覚野への tSMS 刺激は、神経活動の抑制によるコントラスト感度の低下（Aguila et al., 2016）や、視覚探索課題における成績低下（Gonzalez-Rosa et al., 2015）をもたらすことが報告されている。

中枢神経系に対する tSMS の作用機序については、未だ詳しく解明されていない。しかしながら、現時点では、静磁場刺激を受けることで細胞膜を構成しているリン脂質の回転や配列の変化がもたらされ、イオンチャネルが変形することで、イオンチャネルの活性化速度が低下している可能性が高いと考えられている（Rosen, 1996; Rosen, 2003a; Rosen, 2003b; Shen et al., 2007）。

本研究で着目する hMT+野のニューロンは、一次視覚野や、二次、三次視覚野ニューロンと同様に、対側視野に受容野を持つ（Albright and Desimone, 1987）。したがって、左半球の hMT+野に tSMS 刺激を行った場合、右視野の運動視能が低下することで、ターゲットの動きに関する視覚情報を主に右視野から取得している CVM 課題の成績が低下することが予想される。実際に、左半球の hMT+野に対して TMS 刺激を行った研究では、視覚ターゲットの検出や定位応答（Valero-Cabre et al., 2006）や、RDK を用いた運動方向弁別能（Strong et al., 2019）が、右視野においてのみ低下することが報告されている。このように、TMS 刺激による hMT+野の皮質興奮性の低下は、事象関連電位といった生理学的反応だけでなく、行動成績にも影響を及ぼすことが明らかになっている。

以上より、左半球の hMT+野に tSMS 刺激を行うと、左 hMT+野の皮質興奮性が抑制されることが予想される。第 2 章では、運動視能のゆらぎの要因として hMT+野の神経活動に着目し、tSMS 介入の前中後に第 1 章で用いた MDD 課題を実施し、tSMS 介入による対側・同側視野における課題成績の変化を調べることで、hMT+野の神経活動状態と運動視能の関係について明らかにすることを目的とした。

3.2　方法

3.2.1　実験参加者

実験参加者として、①視力もしくは矯正視力が正常で、②心臓にペースメーカーおよび除細動器を装着していない、③ニッケルアレルギーがない、④身体に、クリップ、コイル、脳室腹腔短絡術、プロテーゼ、補聴器などを含む、金属製の埋め込み器具を装着していない、という条件を満たす卓球競技者 14 名（年齢 21.3±1.7 歳、卓球競

技歴 8.8±2.5 年、女性 4 名）が参加した。全ての実験参加者に対して、実験に先立ち本研究の目的と内容についての事前説明を行い、インフォームドコンセントを得た。本研究は、大阪大学研究倫理審査委員会により承認された研究手法および実験手続き（承認番号: L021）に基づいて実施された。

3.2.2 運動方向弁別課題（Motion Direction Discrimination task: MDD 課題）

運動視能の評価には、第 2 章と同様の運動方向弁別課題（Motion Direction Discrimination task: MDD 課題）を用いた（図 1A-C）。

3.2.3 実験手順

本研究は、3 日間の Familiarization session と、1 日の Preliminary experimental session、2 日間の Final experimental session の計 6 日間で構成された（図 13）。

Familiarization session では、第 1 章と同様、運動コヒーレンス 80%と 20%において、正答率がそれぞれ 100%と 75%以上になるまで MDD 課題を行った。なお、本実験の Familiarization session は、第 1 章の実験に参加していない参加者のみ実施した。

Preliminary experimental session では、第 1 章と同様に、参加者は 9 つの運動コヒーレンス条件（1, 7, 11, 15, 19, 25, 32, 46, 100%）で MDD 課題を行った。各コヒーレンス条件の 1 セットの試行数は 16 回で、計 2 セット、合計で 36 試行実施した。セット間に 5 分間の休憩を設定した。各コヒーレンス条件において 2 セットの平均正答率を算出し、Naka-Rushton 関数（Soma et al., 2012）を用いてフィッティングし、得られた関数の最大正答率と最小正答率の差を 100%（Rmax）とした。 第 1 章と同様に、30, 50, 70%Rmax となるコヒーレンス値を C30、C50、C70 と定義し、Final experimental session で用いるコヒーレンス条件として設定した（図 4）。Preliminary experimental session の実験時間は 60 分であった。

Final experimental session では、各実験日の初めに、刺激部位となる左半球 hMT+野を特定した。参加者は頭部用のプレスネットを首まで被った状態で、外後頭隆起の背側 3cm、左側 5cm（Battelli et al., 2002; Beckers and Zeki, 1995; Campana et al., 2002; Campana et al., 2011; Edwards et al., 2017; Mather et al., 2016; Stewart et al., 1999; Théoret et al., 2002）を各参加者の左半球の hMT+野と設定した。続いて、介入前の Pre-test として、MDD 課題を 3 種類のコヒーレンス条件（C30, C50, C70）で各 1 セットずつ行った。1 セットにおける試行数は 32 回であった。

その後、座位安静状態で 30 分間、左半球の hMT+野に介入（tSMS 刺激または sham 刺激）を行った（図 14）。tSMS 刺激には、直径 60mm、厚さ 30mm、重さ 670g、公称強度 120kg の円筒形ネオジウム（NdFeb）磁石（MAG60r、Neurek 社、スペイン）を用いた。Sham 刺激には、直径、厚さ、重さ、見た目が全て tSMS 刺激と同様の、ステンレス鋼を用いた。tSMS の効果は極性に依存しないため（Oliviero et al., 2011）、本研究では、

全ての参加者においてS極磁場を使用した。

介入開始から30分経過後、参加者は、刺激状態を維持したまま、顎台で頭部を固定し、MDD課題を3種類のコヒーレンス条件（C30, C50, C70）で各1セットずつ行った（During-test）。終了後、頭部から介入用の刺激を離し、再度、同じ条件でMDD課題を行った（Post-test）。参加者は、介入時の刺激の種類（tSMS, sham）を知らされておらず、2日目のFinal experimental session終了時に、2日間の刺激の種類についての予想を回答した（Carrasco-López et al., 2017; Dileone et al., 2018; Gonzalez-Rosa et al., 2015; Lozano-Soto et al., 2018; Oliviero et al., 2011）。MDD課題における各コヒーレンス条件の実施順は、参加者間でカウンターバランスをとった。Final experimental session の1日あたりの実験時間は90分であり、2日間は、各参加者において、1週間間隔で同一時刻に実施した。参加者は、各実験日の24時間前からアルコールとカフェイン摂取を控えるよう指示された。本実験は、刺激の種類が実験者・参加者ともに知らされていないダブルブラインド法、かつ、クロスオーバーデザインにより実施した。

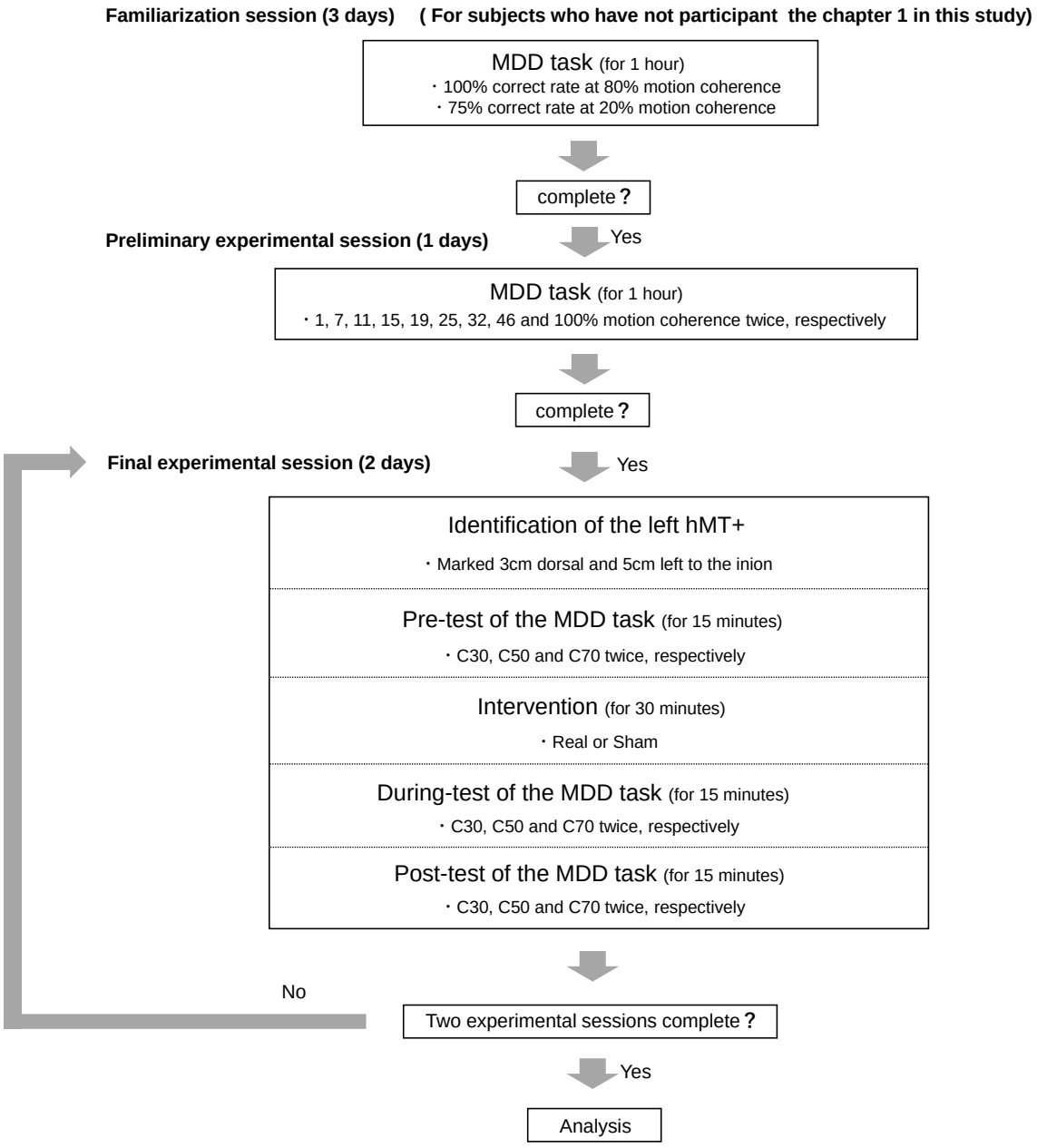


図 13：実験プロトコルの概要。本研究は、3 日間の Familiarization session と、1 日の Preliminary experimental session、3 日間の Final experimental session で構成した。

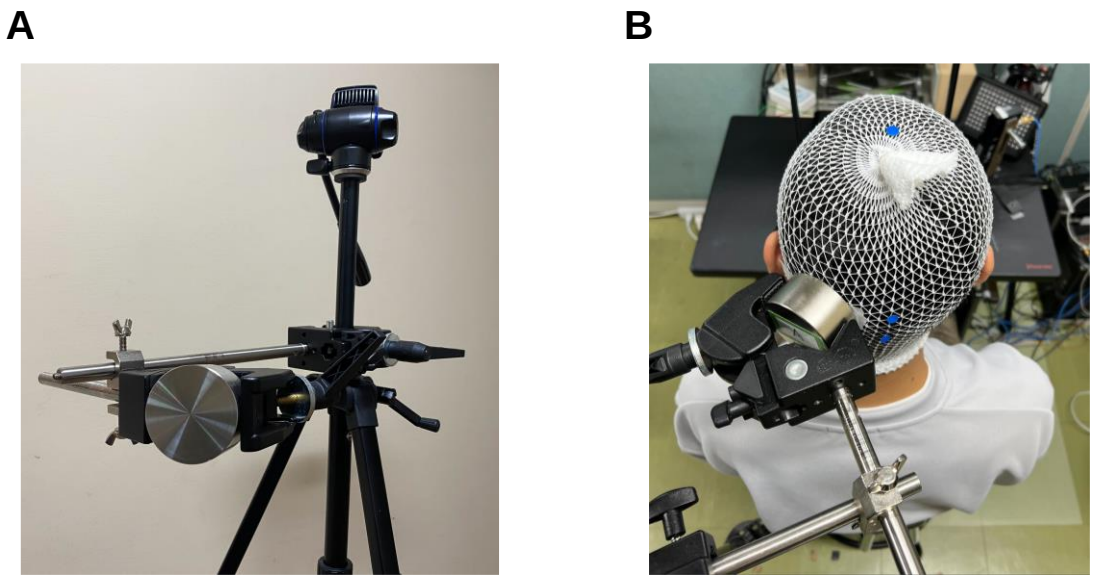


図 14：（A）実験のセットアップ。固定器を作成した。（B）介入中の様子。参加者は 30 分間、座位安静状態を維持した。磁石の中心が、同定した hMT+野に接するように設置し、介入中は位置が外れないよう、実験者が後部から常にモニターした。

3.2.4　データ分析

MDD 課題における正答率（正確さ）および正答試行の平均反応時間（速さ）を運動視能の指標とした。運動視能に対する介入の効果は、次の式（(During-test の成績 − Pre-test の成績）/ Pre-test の成績）＊ 100 により、刺激介入前に対する介入中の成績の変化率（Δ）として算出し、Δ正答率とΔ反応時間について統計解析を実施した。

3.2.5　統計解析

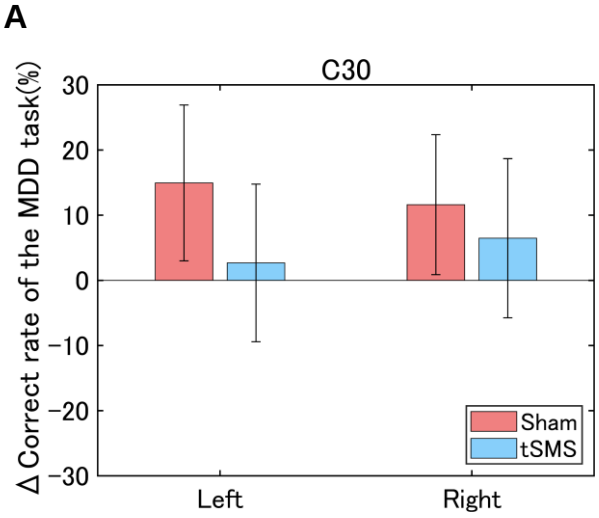
まずは Shapiro-Wilk 検定を用いて、得られたデータが全て正規分布に従うことを確認した。その後、各コヒーレンス条件のΔ正答率およびΔ反応時間において、刺激の種類（tSMS/sham）×刺激位置（Right/Left）を要因とした反復測定による二要因分散分析を行った。有意な交互作用が認められた場合、Bonferroni 法による多重比較を行った。また、参加者が刺激の種類を識別することができていたかどうかについて、カイ二乗検定を用いて分析を行った。有意水準は、$p < 0.05$ とした。

3.3　結果

参加者は、2 日間の実験終了後に、適用された刺激の種類（tSMS または sham）について質問されたが、各介入時に用いられた刺激が tSMS 刺激か sham 刺激かを識別することはできなかった（$\chi^2 = 0.29, p = 0.59$）。

3.3.1　対側（右）・同側（左）視野における MDD 課題の正答率への影響

MDD 課題の各コヒーレンス条件における Δ 正答率に対して、刺激種類（tSMS/sham）×刺激位置（Right/Left）を要因とした反復測定による二要因分散分析を行った。変化率が正の値を示す場合は tSMS 刺激および sham 刺激によって正答率が高くなったことを、負の値を示す場合は低くなったことを意味する。C30 と C50 においては、刺激種類・刺激位置の有意な主効果および有意な交互作用は認められなかった。C70 においては、刺激種類・刺激位置の有意な主効果は示されなかったが、有意な交互作用が認められた（$F_{1, 13} = 11.133, p < 0.01$）。多重比較の結果、右視野において、tSMS 刺激条件は sham 刺激条件に比べて有意に Δ 正答率が低く（$p < 0.01$）、また、tSMS 刺激条件における右視野の Δ 正答率は左視野に比べて有意に低くなった（$p < 0.01$）（図 15A-C）。



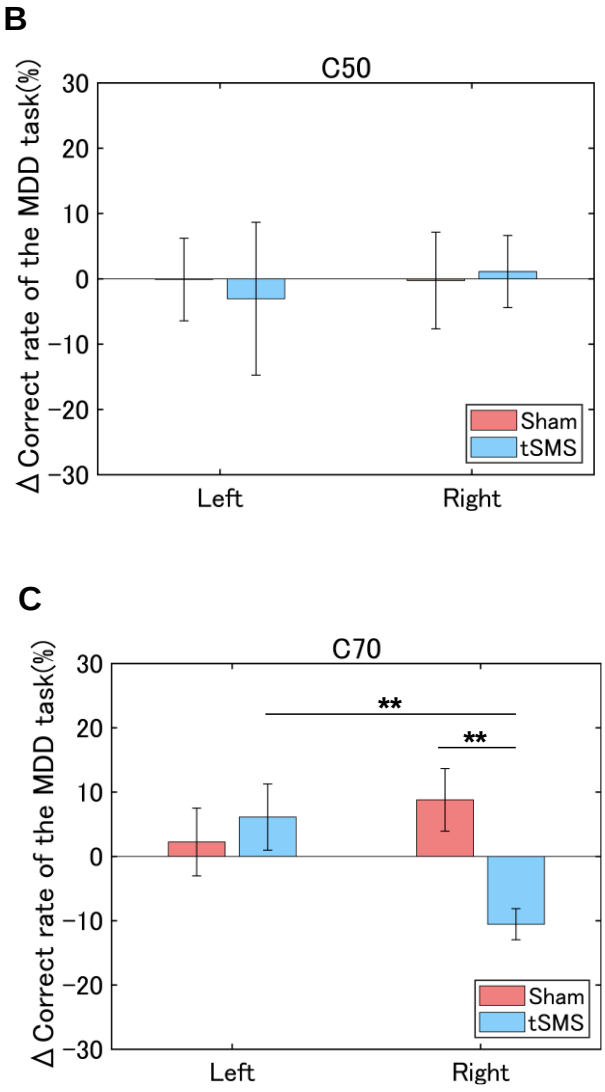
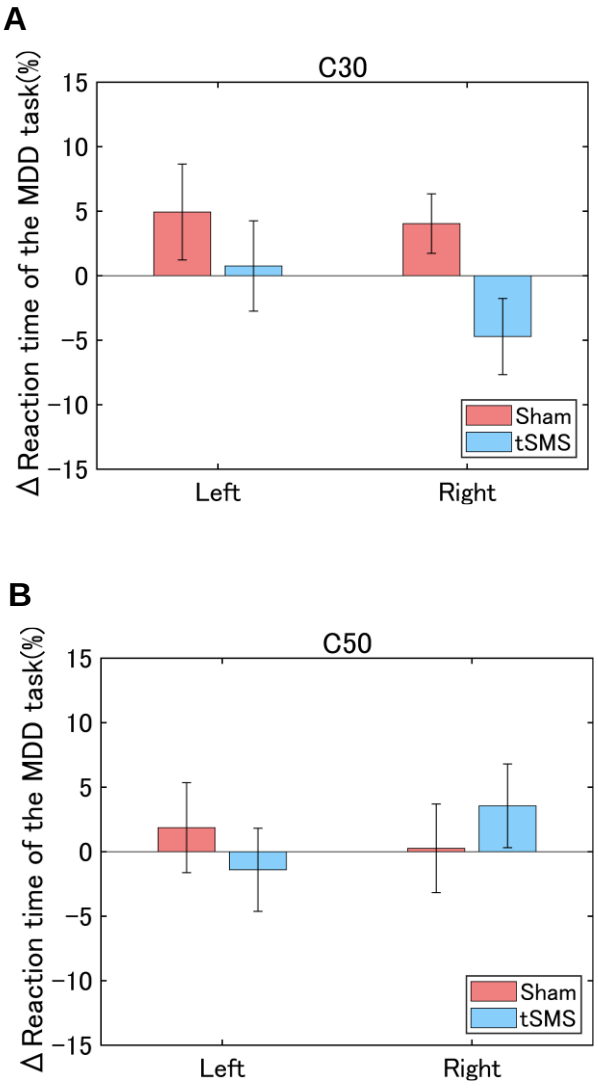


図 15： 視野別の正答率に対する tSMS/sham 刺激介入の効果。（A）C30、（B）C50、（C）C70 における Δ 正答率。エラーバーは標準誤差を示す。** $p < 0.01$

3.3.2　対側（右）・同側（左）視野における反応時間への影響

MDD 課題の各コヒーレンス条件における、タイムアウトの試行を除いた全試行の Δ 反応時間に対して、刺激の種類（tSMS/sham）×刺激位置（Right/Left）を要因とした反復測定による二要因分散分析を行った。Δ 反応時間が正の値を示す場合は tSMS 刺激および sham 刺激によって反応時間が遅くなったことを、負の値を示す場合は速くなったことを表している。分散分析の結果、いずれのコヒーレンス条件においても有意な主効果および交互作用は認められなかった（図 16A-C）。


A
C30
Δ Reaction time of the MDD task(%)
15
10
5
0
−5
−10
−15
Sham
tSMS
Left
Right
B
C50
Δ Reaction time of the MDD task(%)
15
10
5
0
−5
−10
−15
Sham
tSMS
Left
Right

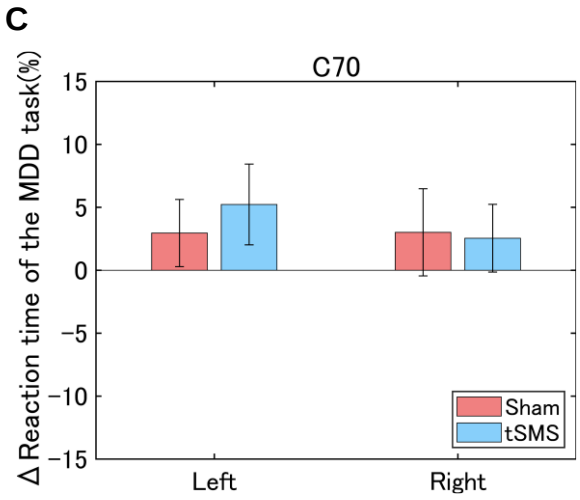
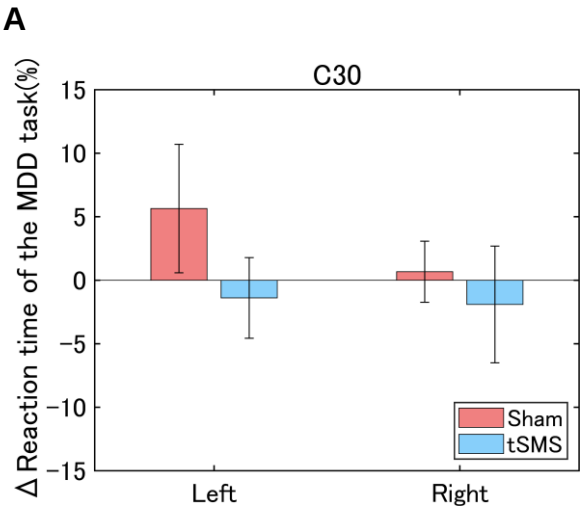


図 16：視野別の反応時間に対する tSMS/sham 刺激介入の効果。（A）C30、（B）C50、（C）C70 における Δ 反応時間。エラーバーは標準誤差を示す。

3.3.3　対側（右）・同側（左）視野における正答時の反応時間への影響

MDD 課題の各コヒーレンス条件における正答試行のみの Δ 反応時間を算出し、刺激の種類（tSMS/sham）×刺激位置（Right/Left）を要因とした反復測定による二要因分散分析を行った。分散分析の結果、いずれのコヒーレンス条件においても有意な主効果および交互作用は認められなかった（図 17A-C）。



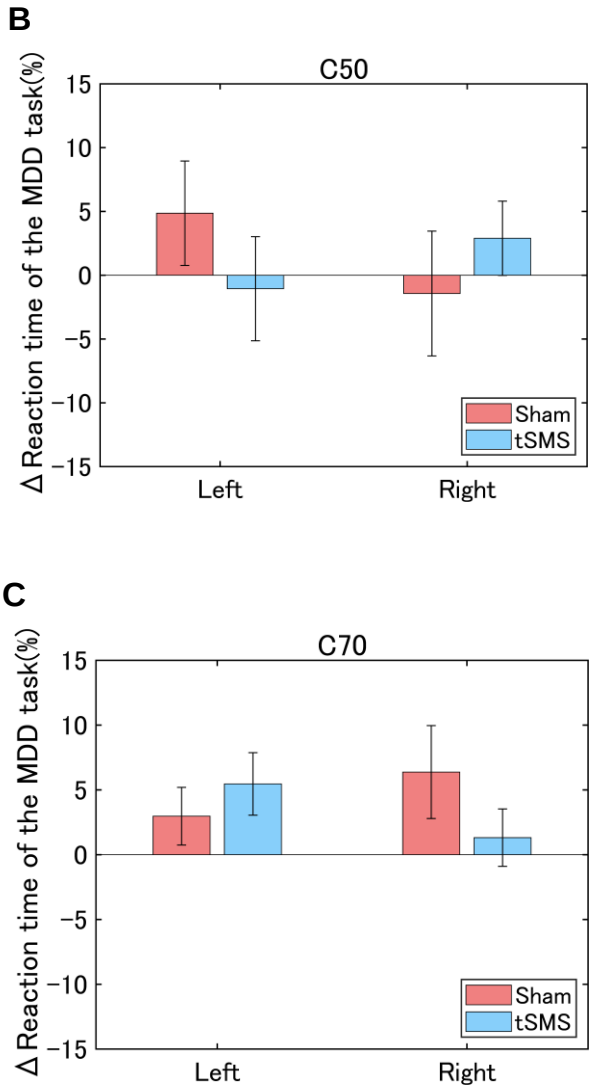


図 17：視野別の正答試行の反応時間に対する tSMS/sham 刺激介入の効果。（A）C30、（B）C50、（C）C70 における正答試行の Δ 反応時間。エラーバーは標準誤差を示す。

3.4 考察

本章では、左半球の hMT+野に対して、大脳皮質の興奮性を低下させる作用を持つ tSMS 刺激による介入を行うことで、対側（右）・同側（左）視野における運動視能（MDD 課題成績）の変化を検討した。主な結果は以下の通りである。コヒーレンス条件 C70 における正答率の変化率（Δ 正答率）は、(1) 対側（右）視野において、sham 条件に比べて tSMS 条件で有意に低く、(2) tSMS 条件において、同側（左）視野に比

べて対側（右）視野で有意に低くなった。一方、(3) 反応時間については、いずれのコヒーレンス条件においても、tSMS 刺激による有意な変化は観察されなかった。

3.4.1　運動方向弁別能に対する tSMS 介入の効果

ヒトにおける視覚的な動きの知覚には、脳の様々な領域の神経活動が関与するが（Furlan and Smith, 2016）、その中で、最も重要な役割を担うと考えられている視覚領域が、本研究で介入対象とする hMT+野である。視覚刺激の運動に関係した神経活動が脳機能イメージング研究（Amano et al., 2009; Chulham et al, 2001; McKeefry et al., 1997; Orban et al., 2004; Tootell et al., 1995; Tootell and Nasr, 2017; Watson et al., 1993; Zeki et al., 1991）で報告されているとともに、脳損傷患者における運動視障害（Plant and Nakayama, 1993; Vaina, 1989; Vaina and Cowey, 1996; Zihl et al., 1983）が報告されている。

ヒトの hMT+野は、霊長類マカクザルの MT 野の相同体と考えられており、MT 野の損傷によってサルの運動方向弁別に障害が起こることが報告されている（Newsome et al., 1985; Newsome and Pare, 1988）。さらに、本研究で採用した動くドット刺激のコヒーレント運動の方向をサルが判断する時の MT 野ニューロンの神経活動を記録した神経生理学的研究は、同一刺激に対する神経応答が試行毎に変動すること、その変動がサルの運動方向判断の感度やゆらぎと高い相関関係にあることを明らかにしている（Newsome et al., 1989）。そのため、ヒトにおいても hMT+野の神経活動状態（特に視覚応答の程度）が運動視能の高低に寄与していると考えられ、本研究の実験 1（第 2 章）で観察された運動視能の日間変動にも hMT+野の神経活動状態の変動が関係していると考えられる。

事実、非侵襲的（経頭蓋）脳刺激法を用いた hMT+野への様々な介入が運動方向弁別能などを変化させることが報告されており（Antal et al., 2004）、hMT+野の神経活動状態と運動視能の因果関係を支持する根拠となっている。例えば、経頭蓋磁気刺激法の刺激方法の一つである反復経頭蓋磁気刺激（rTMS）は刺激条件によって皮質興奮性を低下させることが可能であり（Beynel et al., 2020）、hMT+野に rTMS 介入を行うと、運動速度弁別能（Mckeefry et al., 2008）やコヒーレント運動の運動方向弁別能（Strong et al., 2019）などが低下することが知られている。本研究で用いた経頭蓋静磁場刺激（tSMS）も皮質興奮性を低下させる作用を有することを考慮すると、これらの研究は、hMT+野の興奮性が低下している状態では運動視能も低くなる、という点において一致した結論に達している。

hMT+野には 2 つの主要な視覚領域が含まれており、MT/TO-1 および MST/TO-2 と呼ばれている。前者はサルの MT 野、後者は MST 野の相同体と考えられており、どちらも本研究における tSMS 介入の影響を受けていると考えられる。Huk ら（2002）は、視覚刺激として注視点に対して拡散・収束するドット刺激を用いて、MT/TO-1 は

網膜部位対応地図を持つのに対して、MST/TO-2 では明瞭な地図を持たないことを示した。また、ヒト以外の霊長類においても、MT 野とは異なり（Albright and Desimone, 1987）、MST 野には同側視野に最大 40°まで伸びる大きな受容野（RF）を持つニューロンの存在が知られている（Raiguel et al., 1997）。本研究では、左半球の hMT+野に対して tSMS 刺激を行った際、右視野における MDD 課題の正答率が、sham 刺激時に比べて有意に低下した（$p < 0.01$）。この結果は、RDK 刺激を用いた運動方向弁別課題における正答率が、左半球の hMT+野に rTMS 介入を行うと、対側（右）視野のみ低下することを報告した Strong ら（2019）の結果と一致する。このような運動方向弁別課題における tSMS の明瞭な視野特異的効果は、網膜部位対応地図を有し、対側視野に受容野を持つ MT/TO-1 野が課題遂行に重要な役割を果たすことを示唆する。

両半球の hMT+野に rTMS 介入を行った研究（Strong et al., 2019）では、左 hMT+野に刺激した場合には、本研究と同様に、対側（右）視野でのみ運動方向弁別能が低下したが、右 hMT+野に刺激した場合には、対側（左）視野だけでなく、同側（右）視野においても運動方向弁別能が低下することが報告されている。通常、tSMS 介入においては、刺激半球が支配する対側視野でのみ効果が示されると考えられるが、この現象は半球間で異なると考えられる。本研究では左 hMT+野に対してのみ tSMS 刺激を行ったが、右 hMT+野に対して介入を行った場合、対側（左）視野に加えて同側（右）視野においても MDD 課題の成績が低下する可能性が示唆される。右 hMT+野への tSMS 刺激による両側視野への効果のメカニズムは不明であり、今後のさらなる研究が必要である。

本研究で採用した tSMS 刺激による皮質興奮性の修飾作用のメカニズムについては、現在のところ詳細には明らかにされていない。刺激検出課題遂行中のサルの一次視覚野（V1）と麻酔されたネコの V1 へ tSMS 刺激を行った研究は、tSMS 刺激が神経活動を抑制することでコントラスト感度を低下させることを報告している（Aguila et al., 2016）。細胞レベルでは、静磁場刺激によってリン脂質の回転や配列の変化がもたらされ、イオンチャネルが変形することでその活性化の速度が低下している可能性が指摘されており（Rosen, 1996; Rosen, 2003a; Rosen, 2003b; Shen et al., 2007）、これが神経活動抑制につながった可能性がある。しかし、本研究における tSMS 刺激による運動視能低下の神経メカニズムについては不明なままであり、さらなる研究が必要である。

3.4.2　運動コヒーレンスによる tSMS 介入の効果の違い

本研究で用いた MDD 課題においてターゲットの運動方向を弁別するためには、ランダム方向に動く無数のドット刺激（ノイズ）から同一方向に動くターゲット（シグナル）を分離させる必要がある。したがって、ノイズに比べてシグナルの強度が大きいほど、両者の分離が容易になる（Thomas, 2005）。ノイズによって引き起こされる

hMT+野の活動に比べて、シグナル（ドットのコヒーレンス運動刺激）に対する hMT+野の活動は強くなること（Braddick et al., 2001）、また、運動コヒーレンスが増加することによって、hMT+野の活動が上昇するという正の相関が報告されている（Rees et al., 2000; Aspell et al., 2005）。本研究においても，Pre-test 時の MDD 課題における正答率は C30, C50, C70 の順に高くなっていることが確認されている。C30 のような低コヒーレンス条件ではシグナルの強度が弱く、シグナルとノイズの分離が難しいため運動方向弁別能が低くなり、一方で、C70 のような高コヒーレンス条件ではシグナルの強度が強く、ノイズとの分離が容易になるため、運動方向弁別能が高くなったと考えられる。したがって、本研究で実施した MDD 課題における運動方向弁別能の高低は、シグナルとノイズの分離の難易度を反映していると考えられる。

本研究では、tSMS 介入による運動視能の低下効果は、3 種類の運動コヒーレンス条件のうち、C70 でのみ起こり、C30 および C50 ではみられなかった。運動コヒーレンスは、上述したように運動シグナルの強度を意味し、これは視覚刺激の入力強度に相当する。本研究と同様に、視覚刺激検出能に対する tSMS の介入効果が、刺激入力強度によって異なることがサルを用いた研究で報告されている。Aguila ら（2016）は、サルに様々なコントラスト条件（視覚刺激の入力強度）の刺激パッチについて刺激検出課題を実施し、V1 に対する tSMS 介入の効果を検討した。その結果、30 分間の tSMS 介入では、課題成績（視覚刺激検出率）が 70%相当の高コントラスト条件においてのみ課題成績が低下した。この結果は、30 分間の介入を経て MDD 課題を行った際、C70 条件でのみ有意に正答率が低下した本研究の結果と同様であり、tSMS 効果における刺激入力効果依存性の可能性を強く支持する。以上より、視覚野に対する tSMS の介入効果は、刺激の入力強度によって異なり、C70 相当という比較的検出率が高い条件において最も強く得られることが示唆された。今後、入力強度の違いが tSMS の介入効果の違いを引き起こすメカニズムの解明については、さらなる研究が必要である。

3.4.3　今後の課題

本章では、左 hMT+野へ tSMS 介入を行い、皮質興奮性を抑制させることで、支配を受ける右視野における運動視能が低下することが明らかになった。第 2 章の結果を踏まえると、CVM 課題では、RCA 発生までに、ターゲットの動きに関する視覚情報を主に右視野で捉えているため、特に、競技歴が長い卓球選手における左半球の hMT+野への tSMS 介入は、CVM 課題のパフォーマンス（連続視覚運動パフォーマンス）も低下させることが予想される。今後、左 hMT+野への tSMS 刺激によって CVM 課題成績の低下が実証されれば、連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎが運動視能のゆらぎに起因しているという第 2 章の結果と合わせ、運動視能および連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎは hMT+野の神経活動の高低によって導かれていると結論づけることができる。

しかし、知覚判断に関わる脳の情報処理は少なくとも、①外界の動きの情報を脳内に再現する感覚情報処理プロセスと②知覚判断に必要な情報を収集するプロセスの 2 段階に分けることができると指摘されている（Gold and Shadlen, 2001; Gold and Shadlen, 2007）。例えば、運動方向の知覚判断の場合、MT 野の神経活動により運動情報が表現され、その情報がプールされ、感覚－運動変換を司っている領域（LIP 野）（Shadlen and Newsome, 2001）や前頭眼野、前頭前野（Kim and Shadlen, 1999）、上丘（Horwitz and Newsome, 1999）などでの運動情報の時間積分を反映した漸増活動が生じる結果として運動方向が判断されると考えられている（Shadlen and Newsome, 2001; Gold and Shadlen, 2007）。そのため、本研究においても、hMT+野のゆらぎで説明できない連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎについては、運動方向の判断プロセスのゆらぎを反映している可能性がある。連続視覚運動パフォーマンスのゆらぎの全容解明には、この点に関する検証実験が今後必要となる。

第４章　結論

本研究により、卓球競技者において、①運動視能および連続視覚運動パフォーマンスは日々ゆらいでいること、②特に、競技歴が長い選手においては、連続視覚運動パフォーマンスおよびその速度と精度のゆらぎは運動視能のゆらぎに起因すること、③運動視能のゆらぎは、hMT+野の神経活動の高低に起因すること、が明らかになった。したがって、アスリートのパフォーマンスを高いレベルで安定化させるためには、hMT+野のコンディションを整え、神経活動を高いレベルで維持することが重要であると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、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実験・解析、論文執筆に至るまで、終始丁寧なご指導・ご鞭撻を承りました。また、研究の楽しさや厳しさを教えていただくとともに、研究者としての心得や人としての在り方について親身になってご指導していただきました。心より感謝申し上げます。

大阪大学大学院生命機能研究科 北澤茂教授、八木健教授、田村弘准教授には、本論文の審査だけでなく、実験手法や解析方法に関して丁寧なご指導・ご鞭撻を賜りました。厚く御礼申し上げます。

大阪大学全学教育推進機構 小見山高明講師、大阪大学大学院医学系研究科 青山千紗助教、大阪保健医療大学 木村晃大講師には、本研究に関しまして技術サポートや多くのご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。

そして、研究生活での日々を共に過ごした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くださった大阪大学卓球部の皆様、大阪大学医学部卓球部の皆様に感謝し、謝辞に変えさせていただきます。

参考文献

Aguila J, Cudeiro J and Rivadulla C. (2016) Effects of static magnetic fields on the visual cortex: reversible visual deficits and reduction of neuronal activity. *Cereb Cortex,* 26:628-638. doi: 10.1093/cercor/bhu228.

Albright TD and Desimone R. (1987) Local precision of visuotopic organization in the middle temporal area (MT) of the macaque. *Exp Brain Res*, 65:582-92. doi: 10.1007/BF00235981.

Amano K, Wandell BA and Dumoulin SO. (2009) Visual field maps, population receptive field sizes, and visual field coverage in the human MT+ complex. *J Neurophysiol*, 102:2704-2718. doi: 10.1152/jn.00102.2009.

Andrade MJOD, Neto AC, Oliveira ARD, Santana JB and Santos NAD. (2018) Daily variation of visual sensitivity to luminance contrast: effects of time of measurement and circadian typology. *Chronobiol Int*, 35:996-1007. doi: 10.1080/07420181450753.

Antal A, Nitsche MA, Kruse W, Kincses TZ, Hoffmann KP and Paulus W. (2004) Direct current stimulation over V5 enhances visuomotor coordination by improving motion perception in humans. *J Cogn Neurosci*, 16:521-527. doi: 10.1162/089892904323057263.

Aoyama C, Goya R, Suematsu N, Kadota K, Yamamoto Y and Shimegi S. (2022) Spatial accuracy of predictive saccades determines the performance of continuous visuomotor action. *Front Sports Act Living,* 3 :5478. doi: 10.3389./fspor.2021.775478.

Aspell JE, Tanskanen T and Hurlbert AC. (2005) Neuromagnetic correlates of visual motion coherence. *Eur J Neurosci*, 22:2937-2945. doi: 10.1111/j.1460-9568.2005.04473.x.

Bae EH, Schrader LM, Machii K, Alonso-Alonso M, Riviello Jr JJ, Pascual-Leone A., and Rotenberg A. (2007) Safety and tolerability of repetitive transcranial magnetic stimulation in patients with epilepsy: a review of the literature. *Epilepsy Behav*, 10:521-528. doi: 10.1016/j.yebeh.2007.03.004.

Battelli L, Black KR, and Wray SH. (2002) Transcranial magnetic stimulation of visual area V5 in migraine. *Neurology*, 58:1066-1069. doi: 10.1212/wnl.58.7.1066.

Beck DM, Rees G, Frith CD and Lavie N. (2001) Neural correlates of change detection and change blindness. *Nat Neurosci*, 4:645-650. doi: 10.1038/88477.

Becker HG, Erb M and Haarmeier T. (2008) Differential dependency on motion coherence in subregions of the human MT+ complex. *Eur J Neurosci*, 28:1674-1685. doi: 10.1111/j.1460-9568.2008.06457.x.

Beckers G and Zeki S. (1995) The consequences of inactivating areas V1 and V5 on visual motion perception. *Brain*, 118:49-60. doi: 10.1093/brain/118.1.49.

Beynel L, Powers JP and Appelbaum LG. (2020) Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation on resting-state connectivity: A systematic review. *Neuroimage*, 211:116596. doi: 10.1016/j.neuroimage.2020.116596.

Bezzola L, Mérillat S, Gaser C and Jäncke L. (2011) Training-induced neural plasticity in golf novices. *J Neurosci*, 31:12444-12448. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1996-11.2011.

Bosco G, Carrozzo M, Lacquaniti F. (2008) Contributions of the human temporoparietal junction and MT/V5+ to the timing of interception revealed by transcranial magnetic stimulation. *J Neurosci,* 28:12071-12084. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2869-08.2008.

Bowdle RHW, Warren BL and Kim J. (2016) Time of day effect on isokinetic peak torque during knee flexion and extension. *Isokinet Exerc Sci*, 24:285-293. doi: 10.3233/IES-160628.

Braddick O. (1974) A short-range process in apparent motion. *Vision Res*, 14:519–72. doi: 10.1016/0042-6989(74)90041-8.

Braddick OJ, O'Brien JM, Wattam-Bell J, Atkinson J, Hartley T and Turner R. (2001) Brain areas sensitive to coherent visual motion. *Perception*, 30:61-72. doi: 10.1068/p3048.

Britten KH, Shadlen MN, Newsome WT and Movshon JA. (1992) The analysis of visual motion: a comparison of neuronal and psychophysical performance. *J Neurosci*, 12:4745-4765. doi: 10.1523/JNEUROSCI.12-12-04745.1992.

Britten KH, Newsome WT, Shadlen MN, Celebrini S and Movshon JA. (1996) A relationship between behavioral choice and the visual responses of neurons in macaque MT. *Vis Neurosci*,

13:87-100. doi: 10.1017/s095252380000715x.

Campana G, Cowey A and Walsh V. (2002) Priming of motion direction and area V5/MT: a test of perceptual memory. *Cerebral Cortex*, 12:663-669. doi: 10.1093/cercor/12.6.663.

Campana G, Pavan A, Maniglia M and Casco C. (2011) The fastest (and simplest), the earliest: The locus of processing of rapid forms of motion aftereffect. *Neuropsychologia*, 49:2929-2934. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2011.06.020.

Carrasco-López C, Soto-León V, Céspedes V, Profice P, Strange BA, Foffani G and Oliviero A. (2017) Static magnetic field stimulation over parietal cortex enhances somatosensory detection in humans. *J Neurosci*, 37:3840-3847. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2123-16.2017.

Culham J, He S, Dukelow S and Verstraten FA. (2001) Visual motion and the human brain: what has neuroimaging told us?. *Acta Psychol (Amst)*, 107:69-94. doi: 10.1016/s0001-6918(01)00022-1.

Dessing JC, Vesia M and Crawford JD. (2013) The role of areas MT+/V5 and SPOC in spatial and temporal control of manual interception: an rTMS study. *Front Behav Neurosci*, 7:15. doi: 10.3389./fnbeh.2013.00015.

Dileone M, Mordillo-Mateos L, Oliviero A and Foffani G. (2018) Long-lasting effects of transcranial static magnetic field stimulation on motor cortex excitability. *Brain Stimul*, 11:676-688. doi: 10.1016/j.brs.2018.02.005.

Draganski B, Gaser C, Busch V, Schuierer G, Bogdahn U and May A. (2004) Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427:311-312. doi: 10.1038/427311a.

Draganski B, Gaser C, Kempermann G, Georg Kuhn H, Winkler J, Büchel C and May A. (2006) Temporal and spatial dynamics of brain structure changes during extensive learning. *J Neurosci*, 26:6314-6317. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4628-05.2006.

Edwards G, Paeye C, Marque P, VanRullen R and Cavanagh P. (2017) Predictive position computations mediated by parietal areas: TMS evidence. *NeuroImage*, 153:49-57. doi: 10.1016/j.neuroimage.2017.03.043.

Field DT and Wann JP. (2004) Perceiving time to collision activates the sensorimotor cortex. *Curr Biol*, 15:453-458. doi: 10.1016/j.cub.12081.

Fort A, Besle J, Giard MH and Pernier J. (2005) Task-dependent activation latency in human visual extrastriate cortex. *Neurosci Lett*, 379:144-148. doi: 10.1016/j.neulet.12076.

Furlan M and Smith AT. (2016) Global motion processing in human visual cortical areas V2 and V3. *J Neurosci*, 36:7314-7324. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0025-16.2016.

Gold JI and Shadlen MN. (2001) Neural computations that underlie decisions about sensory stimuli. *Trends Cogn Sci*, 5:10-16. doi: 10.1016/s1364-6613(00)01567-9.

Gold JI and Shadlen MN. (2007) The neural basis of decision making. *Annu Rev Neurosci*, 30:535-574. doi: 10.1146/annurev.neuro.29.051605.113038.

Gonzalez-Rosa JJ, Soto-Leon V, Real P, Carrasco-Lopez C, Foffani G, Strange BA and Oliviero A. (2015) Static magnetic field stimulation over the visual cortex increases alpha oscillations and slows visual search in humans. *J Neurosci*, 35:9182-9193. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4232-14.2015.

Goodale MA and Milner AD. (1992) Separate visual pathways for perception and action. *Trends Neurosci*, 15:20-25. doi: 10.1016/0166-2236(92)90344-8.

Heimrath K, Spröggel A, Repplinger S, Heinze HJ and Zaehle T. (2020) Transcranial static magnetic field stimulation over the temporal cortex modulating the right ear advantage in dichotic listening. *Neuromodulation*, 23:335-340. doi: 10.1111/ner.13023.

Helfrich RF, Becker HG and Haarmeier T. (2013) Processing of coherent visual motion in topographically organized visual areas in human cerebral cortex. *Brain Topogr*, 26:247-263. doi: 10.1007/s10548-012-0226-1.

Hickey MS, Costill DL, McConell GK, Widrick JJ and Tanaka H. (1992) Day to day variation in time trial cycling performance. *Int J Sports Med*, 13:467-470. doi: 10.1055/s-2007-1021299.

Hoffmann M, Dorn TJ and Bach M. (1999) Time course of motion adaptation: Motion- onset visual evoked potentials and subjective estimates. *Vision Res*, 39:437-444. doi: 10.1016/s0042-

6989(98)00186-2.

Horwitz GD and Newsome WT. (1999) Separate signals for target selection and movement specification in the superior colliculus. *Science*, 284:1158-1161. doi: 10.1126/science.284.5417.1158.

Huk AC, Dougherty RF and Heeger DJ. (2002) Retinotopy and functional subdivision of human areas MT and MST. *J Neurosci*, 22:7195-7205. doi: 10.1523/JNEUROSCI.22-16-07195.2002.

Hülsdünker T, Strüder HK and Mierau A. (2017) Visual motion processing subserves faster visuomotor reaction in badminton players. *Med Sci Sports Exerc*, 49:1097-1110. doi: 10.1249/MSS.0000000000001198.

Hülsdünker T, Strüder HK, Mierau A. (2018) Visual but not motor processes predict simple visuomotor reaction time of badminton players. *Eur J Sport Sci*, 18:190-200. doi: 10.1080/174620171395912.

Hülsdünker T, Ostermann M and Mieau 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. doi: 10.3389./fnbeh.2019.00165.

Hülsdünker T, Ostermann M and Mierau A. (2020) Motion-onset visual potentials evoked in a sport-specific visuomotor reaction task. *J Sport Exerc Psychol*, 14:1-12. doi: 10.1123/jsep.2019-0255.

Hyde KL, Lerch J, Norton A, Forgeard M, Winner E, Evans AC and Schlaug G. (2009) Musical training shapes structural brain development. *J Neurosci*, 29:3019-3025. doi: 10.1523/JNEUROSCI.5118-08.2009.

Kawakami O, Kaneoke Y, Maruyama K, Kakigi R, Okada T, Sadato N and Yonekura Y. (2002) Visual detection of motion speed in humans: spatiotemporal analysis by fMRI and MEG. *Hum Brain Mapp*, 16:104-118. doi: 10.1002/hbm.10033.

Kawano K, Shidara M, Watanabe Y, Yamane S. (1994) Neural activity in cortical area MST of alert monkey during ocular following responses. *J Neurophysiol*, 71:2305-2324. doi: 10.1152/jn.716.2305.

Kim JN and Shadlen MN. (1999) Neural correlates of a decision in the dorsolateral prefrontal cortex of the macaque. *Nat Neurosci*, 2:176-185. doi: 10.1038/5739.

Kirimoto H, Tamaki H, Matsumoto T, Sugawara K, Suzuki M, Oyama M and Onishi H. (2014) Effect of transcranial static magnetic field stimulation over the sensorimotor cortex on somatosensory evoked potentials in humans. *Brain Stimul*, 7:836-840. doi: 10.1016/j.brs.2014.09.016.

Kirimoto H, Asao A, Tamaki H and Onishi H. (2016) Non-invasive modulation of somatosensory evoked potentials by the application of static magnetic fields over the primary and supplementary motor cortices. *Sci Rep*, 6:1-8. doi: 10.1038/srep34509.

Kleim JA, Lussnig E, Schwarz ER, Comery TA and Greenough WT. (1996) Synaptogenesis and Fos expression in the motor cortex of the adult rat after motor skill learning. *J Neurosci*, 16:4539-4535. doi: 10.1523/JNEUROSCI.16-14-04529.1996.

Knaier R, Infanger D, Niemeyer M, Cajochen C and Schmidt-Trucksäss A. (2019a) In athletes, the diurnal variations in maximum oxygen uptake are more than twice as large as the day-to-day variations. *Front Physiol*, 10:219. doi: 10.3389./fphys.2019.00219.

Knaier R, Infanger D, Cajochen C, Schmidt-Trucksaess A, Faude O, Roth R. (2019b) Diurnal and day-to-day variations in isometric and isokinetic strength. *Chronobiol Int*, 36:1537-1549. doi: 10.1080/07420528.2019.1658596.

Kranczioch C, Debener S, Schwarzbach J, Goebel R and Engel AK. (2004) Neural correlates of conscious perception in the attentional blink. *Neuroimage*, 24:704-714. doi: 10.1016/j.neuroimage.09024.

Kuba M, Kubová Z, Kremlác̆ek J, Langrová J. (2006) Motion-onset VEPs: characteristics, methods, and diagnostic use. *Vision Res*, 47:189-202. doi: 10.1016/j.visres.09020.

Lozano-Soto E, Soto-León V, Sabbarese S, Ruiz-Alvarez L, Sanchez-del-Rio M, Aguilar and Oliviero A. (2018) Transcranial static magnetic field stimulation (tSMS) of the visual cortex decreases experimental photophobia. *Cephalalgia*, 38:1493-1497. doi: 10.1177/0333102417736899.

Marois R, Yi DJ and Chun MM. (2004) The neural fate of consciously perceived and missed events in the attentional blink. *Neuron*, 41:465-472. doi: 10.1016/s0896-6273(04)00012-1.

Maruyama, Kaneoke K, Watanabe Y and Kakigi R. (2002) Human cortical responses to coherent and incoherent motion as measured by magnetoencephalography. *Neurosci Res*, 44:195-205. doi: 10.1016/s0168-0102(02)00129-3.

Mather G, Battaglini L and Campana G. (2016) TMS reveals flexible use of form and motion cues in biological motion perception. *Neuropsychologia*, 84:193-197. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2016.02.015

Matsuda K, Nagami T, Sugase Y, Takemura A and Kawano K. (2017) A Widely applicable real-time mono/binocular eye tracking system using a high frame-rate digital camera. *In International Conference on Human-Computer Interaction,* Springer, Cham. 593-608.

McKeefry DJ, Watson JDG, Frackowiak RSJ, Fong K and Zeki S. (1997) The activity in human areas V1/V2, V3, and V5 during the perception of coherent and incoherent motion. *Neuroimage*, 5:1-12. doi: 10.1006/nimg.1996.0246.

McKeefry DJ, Burton MP, Vakrou C, Barrett BT and Morland AB. (2008) Induced deficits in speed perception by transcranial magnetic stimulation of human cortical areas V5/MT+ and V3A. *J Neurosci*, 28:6848-6857. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1287-08.2008.

Mizuyama R, Soma S, Suemastu N, Shimegi S. (2016) Noradrenaline improves behavioral contrast sensitivity via the β-adrenergic receptor. *PLoS ONE*, 11:e0168455. doi: 10.1371/journal.pone.0168455.

Morales OG, Henry ME, Nobler MS, Wassermann EM and Lisanby SH. (2005) Electroconvulsive therapy and repetitive transcranial magnetic stimulation in children and adolescents: a review and report of two cases of epilepsia partialis continua. *Child Adolesc Psychiatr Clin N Am*, 14:193-210. doi: 10.1016/j.chc.2004.07.010.

Muckli L, Singer W, Zanella FE and Goebel R. (2003) Integration of multiple motion vectors over space: An fMRI study of transparent motion perception. *Neuroimage*, 16:843-856. doi: 10.1006/nimg.2002.1085.

Newsome WT, Wurtz RH, Dursteler MR and Mikami A. (1985) Deficits in visual motion processing following ibotenic acid lesions of the middle temporal visual area of the macaque monkey. *Journal of Neuroscience*, 5, 825-840. doi: 10.1523/JNEUROSCI.05-03-00825.1985.

Newsome WT and Pare EB. (1988) A selective impairment of motion perception following lesions of the middle temporal visual area (MT). *J Neurosci*, 22:2201-2211. doi: 10.1523/JNEUROSCI.08-06-02201.1988.

Newsome WT, Britten KH and Movshon JA. (1989) Neuronal correlates of a perceptual decision. *Nature*, 341:52-54. doi: 10.1038/341052a0.

Niedeggen M and Wist ER. (1999) Motion evoked brain potentials parallel the consistency of coherent motion perception in humans. *Neurosci Lett,* 246:61-64. doi: 10.1016/s0304-3940(98)00222-5.

Nitsche MA, Liebetanz D, Lang N, Antal A, Tergau F and Paulus W. (2003) Safety criteria for transcranial direct current stimulation (tDCS) in humans. *Clin Neurophysiol*, 114:2220-2222. author reply 2222-2223. doi: 10.1016/s1388-2457(03)00235-9.

Nojima I, Koganemaru S, Fukuyama H and Mima T. (2015) Static magnetic field can transiently alter the human intracortical inhibitory system. *Clin Neurophysiol*, 126:2314-2319. doi: 10.1016/j.clinph.2015.01.030.

Oliviero A, Mordillo-Mateos L, Arias P, Panyavin I, Foffani G and Aguilar J. (2011) Transcranial static magnetic field stimulation of the human motor cortex. *J Physiol*, 589:4949-4958. doi: 10.1113/jphysiol.2011.211953.

Oliviero A, Carrasco-López MC, Campolo M, Perez-Borrego YA, Soto-León V, Gonzalez-Rosa JJ and Foffani G. (2015) Safety study of transcranial static magnetic field stimulation (tSMS) of the human cortex. *Brain Stimul*, 8:481-485. doi: 10.1016/j.brs.2014.12.002.

Orban GA, Van Essen D and Vanduffel W. (2004) Comparative mapping of higher visual areas in monkeys and humans. *Trends Cogn Sci*, 8:315-324. doi: 10.1016/j.tics.2004.05.009.

Plant GT and Nakayama K. (1993) The characteristics of residual motion perception in the

hemifield contralateral to lateral occipital lesions in humans. *Brain*, 116:1337-1353. doi: 10.1093/brain/116.6.1337.

Raiguel S, Van Hulle MM, Xiao DK, Marcar VL, Lagae L and Orban GA. (1997) Size and shape of receptive fields in the medial superior temporal area (MST) of the macaque. *Neuroreport*, 8:2803-2808. doi: 10.1097/00001756-199708180-00030.

Ramlow L, Sawicki J, Zakharova A, Hlinka J, Claussen JC and Schöll E. (2019) Partial synchronization in empirical brain networks as a model for unihemispheric sleep. *Europhys Lett,* 126: 50007. doi: 10.1209/0295-5075/126/50007.

Rees A, Friston K and Koch C. (2000) A direct quantitative relationship between the functional properties of human and macaque V5. *Nat Neurosci*, 3:716-723. doi: 10.1038/76673.

Rosen AD and Lubowsky J. (1987) Magnetic field influence on central nervous system function. *Exp Neurol*, 95:679-687. doi: 10.1016/0014-4886(87)90308-6.

Rosen AD and Lubowsky J. (1990) Modification of spontaneous unit discharge in the lateral geniculate body by a magnetic field. *Exp Neurol*, 108:261-265. doi: 10.1016/0014-4886(90)90132-c.

Rosen AD. (1996) Inhibition of calcium channel activation in GH3 cells by static magnetic fields. *Biochim Biophys Acta*, 1282:149-155. doi: 10.1016/0005-2736(96)00053-3.

Rosen AD. (2003a) Effect of a 125 mT static magnetic field on the kinetics of voltage activated Na+ channels in GH3 cells. *Bioelectromagnetics*, 24:517-523. doi: 10.1002/bem.10124.

Rosen AD. (2003b) Mechanism of action of moderate-intensity static magnetic fields on biological systems. *Cell Biochem Biophys*, 39:163-173. doi: 10.1385/CBB:39:2:163.

Saijo N, Murakami I, Nishida S and Gomi H. (2005) Large-field visual motion directly induces an involuntary rapid manual following response. *J Neurosci*, 25:4941-4951. doi: 10.1523/JNEUROSCI.4143-04.2005.

Saionz EL, Tadin D, Melnick MD and Huxlin KR. (2020) Functional preservation and enhanced capacity for visual restoration in subacute occipital stroke. *Brain*, 143:1857-1872. doi:

10.1093/brain/awaa128

Sato AY, Tsunoda K, Mizuyama R, Shimegi S. (2020) Serotonin improves behavioral contrast sensitivity of freely moving rats. *PLoS ONE*, 15:e0230367. doi: 10.1371/journal.pone.0230367.

Scase MO, Braddick OJ and Raymond JE. (1996) What is noise for the motion system?. *Vision Res*, 36:2579-2586. doi: 10.1016/0042-6989(95)00325-8.

Schenk T, Ellison A, Rice N, Milner AD. (2004) The role of V5/MT+ in the control of catching movements: an rTMS study. *Neuropsychologia*, 43:189-198. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.1106.

Scholz J, Klein MC, Behrens TE and Johansen-Berg H. (2009) Training induces changes in white-matter architecture. *Nat Neurosci*, 12:1370-1371. doi: 10.1038/n n.2412.

Shadlen MN and Newsome WT. (2001) Neural basis of a perceptual decision in the parietal cortex (area LIP) of the rhesus monkey. *J Neurophysiol*, 86:1916-1936. doi: 10.1152/jn.2001.86.4.1916.

Shen JF, Chao YL and Du L. (2007) Effects of static magnetic fields on the voltage-gated potassium channel currents in trigeminal root ganglion neurons. *Neurosci Lett*, 415:164-168. doi: 10.1016/j.neulet.2007.01.015.

Sheremata SL and Silver MA. (2015) Hemisphere-dependent attentional modulation of human parietal visual field representations. *J Neurosci*, 35:508-517. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2378-14.2015.

Shulman GL, Ollinger JM, Linenweber M, Petersen SE and Corbetta M. (2001) Multiple neural correlates of detection in the human brain. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 98:313-318. doi: 10.1073/pnas.98.1.313.

Silbert BI, Pevcic DD, Patterson HI, Windnagel KA and Thickbroom GW. (2013) Inverse correlation between resting motor threshold and corticomotor excitability after static magnetic stimulation of human motor cortex. *Brain Stimul*, 6:817-820. doi: 10.1016/j.brs.2013.03.007.

Soma S, Shimegi S, Osaki H and Sato H. (2012) Cholinergic modulation of response gain in the

primary visual cortex of the macaque. *J Neurophysiol*, 107:283-291. doi: 10.1152/jn.00330.2011.

Stewart L, Battelli L, Walsh V and Cowey A. (1999) Motion perception and perceptual learning studied by magnetic. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl*, 51:334-350.

Strong SL, Silson EH, Gouws AD, Morland AB and McKeefry DJ. (2019) An enhanced role for right hV5/MT+ in the analysis of motion in the contra-and ipsi-lateral visual hemi-fields. *Behav Brain Res*, 372:112060. doi: 10.1016/j.bbr.2019.112060.

Takamatsu Y, Koganemaru S, Watanabe T, Shibata S, Yukawa Y, Minakuchi M and Mima T. (2021) Transcranial static magnetic stimulation over the motor cortex can facilitate the contralateral cortical excitability in human. *Sci Rep*, 11:1-8. doi: 10.1038/s41598-021-84823-4.

Taubert M, Draganski B, Anwander A, Müller K, Horstmann A, Villringer A and Ragert P. (2010) Dynamic properties of human brain structure: learning-related changes in cortical areas and associated fiber connections. *J Neurosci*, 30:11670-11677. doi: 10.1523/JNEUROSCI.2567-10.2010.

Théoret H, Kobayashi M, Ganis G, Di Capua P and Pascual-Leone A. (2002) Repetitive transcranial magnetic stimulation of human area MT/V5 disrupts perception and storage of the motion aftereffect. *Neuropsychologia*, 40:2280-2287. doi: 10.1016/s0028-3932(02)00112-4.

Tootell RB, Reppas JB, Kwong KK, Malach R, Born RT, Brady TJ, Rosen BR and Belliveau J. W. (1995) Functional analysis of human MT and related visual cortical areas using magnetic resonance imaging. *J Neurosci*, 15:3215-3230. doi: 10.1523/JNEUROSCI.15-04-03215.1995.

Tootell RB and Nasr S. (2017) Columnar segregation of magnocellular and parvocellular streams in human extrastriate cortex. *J Neurosci*, 37:8014-8032. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0690-17.2017.

Thomas DW. (2005) 信号検出理論の基礎. 協同出版, 26.

Treue S and Maunsell JH. (1999) Effects of attention on the processing of motion in macaque middle temporal and medial superior temporal visual cortical areas. *J Neurosci*, 19:7591-7602. doi: 10.1523/JNEUROSCI.19-17-07591.1999.

Tsunoda K, Sato A, Kurata R, Mizuyama R and Shimegi S. (2018) Caffeine improves contrast sensitivity of freely moving rats. *Physiol Behav*, 199:111-117. doi: 10.1016/j.physbeh.11014.

Vaina LM. (1989) Selective impairment of visual motion interpretation following lesions of the right occipito-parietal area in humans. *Biol Cybern*, 61:347-359. doi: 10.1007/BF00200800.

Vaina LM and Cowey A. (1996) Impairment of the perception of second order motion but not first order motion in a patient with unilateral focal brain damage. *Proc Biol Sci*, 263:1225-1232. doi: 10.1098/rspb.1996.0180.

Vaina LM, Cowey A, Eskew RT Jr, LeMay M and Kemper T. (2001) Regional cerebral correlates of global motion perception: Evidence from unilateral cerebral brain damage. *Brain*, 124:310-321. doi: 10.1093/brain/124.2.310.

Valero-Cabre A, Rushmore RJ and Payne BR. (2006) Low frequency transcranial magnetic stimulation on the posterior parietal cortex induces visuotopically specific neglect-like syndrome. *Exp Brain Res*, 172:14-21. doi: 10.1007/s00221-005-0307-4.

Vine SJ, Moore LJ and Wilson MR. (2016) An integrative framework of stress, attention, and visuomotor performance. *Front Psychol*, 7:1671. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01671.

Wassermann EM. (1998). Risk and safety of repetitive transcranial magnetic stimulation: report and suggested guidelines from the International Workshop on the Safety of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, June 5-7, 1996. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 108:1-16. doi: 10.1016/s0168-5597(97)00096-8.

Wassermann EM, Blaxton TA, Hoffman EA, Berry CD, Oletsky H, Pascual-Leone A and Theodore WH. (1999). Repetitive transcranial magnetic stimulation of the dominant hemisphere can disrupt visual naming in temporal lobe epilepsy patients. *Neuropsychologia*, 37:537-544. doi: 10.1016/s0028-3932(98)00102-x.

Watamaniuk SN. (1993) Ideal observer for discrimination of the global direction of dynamic random-dot stimuli. *J Opt Soc Am A*, 10:16-28. doi: 10.1364/josaa.10.000016.

Watson JD, Myers R, Frackowiak RS, Hajnal JV, Woods RP, Mazziotta JC, Shipp S and Zeki S.

(1993) Area V5 of the human brain: evidence from a combined study using positron emission tomography and magnetic resonance imaging. *Cereb Cortex*, 3:79-94. doi: 10.1093/cercor/3.2.79.

Zeki S, Watson JD, Lueck CJ, Friston KJ, Kennard C and Frackowiak RS. (1991) A direct demonstration of functional specialization in human visual cortex. *J Neurosci*, 11:641-649. doi: 10.1523/JNEUROSCI.11-03-00641.1991.

Zihl J, Von Cramon Ds and Mai N. (1983) Selective disturbance of movement vision after bilateral brain damage. *Brain*, 106:313-340. doi: 10.1093/brain/106.2.313.

Zis P, Shafique F, Hadjivassiliou M, Blackburn D, Venneri A, Iliodromiti S and Sarrigiannis PG. (2020) Safety, tolerability, and nocebo phenomena during transcranial magnetic stimulation: a systematic review and meta-analysis of placebo-controlled clinical trials. *Neuromodulation*, 23:291-300. doi: 10.1111/ner.12946.

業績

投稿論文

Takami A, Goya R, Aoyama C, Komiyama T, Kawajiri T and Shimegi S. (2022) Daily fluctuations in visual motion discriminability contribute to daily fluctuations in continuous visuomotor performance. *Front Sports Act Living,* 4 :1009763. doi: 10.3389/fspor.2022.1009763.

学会発表

（国内学会発表における口頭発表）

髙見采加, 渡邊耕平, 青山千紗, 七五三木聡, “覚醒水準と運動視能の関係”, 第 48 回日本スポーツ心理学会大会, 2021 年 11 月

渡邊耕平, 髙見采加, 青山千紗, 七五三木聡, “連続視覚運動における運動視能の寄与”, 第 48 回日本スポーツ心理学会大会, 2021 年 11 月

髙見采加, 七五三木聡, “視覚運動パフォーマンスに関連する運動視能のゆらぎの解明”, Sports Research Innovation Project 若手人材育成活動報告会, 2022 年 2 月

（国内学会発表におけるポスター発表）

髙見采加, 川尻敏孝, 渡邊耕平, 青山千紗, 小見山高明, 呉屋良真, 七五三木聡, “視覚運動におけるパフォーマンスと運動視能の関係”，第 76 回日本体力医学会大会, 2021 年 9 月

渡邊耕平, 髙見采加, 小見山高明, 青山千紗, 七五三木聡, “連続視覚運動における視線行動の寄与”, 第 76 回日本体力医学会大会, 2021 年 9 月

髙見采加, 青山千紗, 渡邊耕平, 川尻敏孝, 小見山高明, 七五三木聡, “運動視能のゆらぎが連続視覚運動パフォーマンスに与える影響”, 2021 年度 生理研研究会, 2022 年 3 月

髙見采加, 青山千紗, 小見山高明, 川尻敏孝, 七五三木聡, “運動視能のゆらぎが

連続視覚運動パフォーマンスの時空間的特性に及ぼす影響”, 第 77 回日本体力医学会大会, 2022 年 9 月

競争的資金の獲得

大阪大学 学際融合を推進し社会実装を担う次世代挑戦的研究者育成プロジェクト, “アスリートのベストパフォーマンス発揮を目指した「脳コンディショニング法」の確立”, 2021 年 10 月−2023 年 3 月, (1,050,000 円)

(公益財団法人) ヤマハ発動機スポーツ振興財団 スポーツチャレンジ助成, “アスリートのパフォーマンスに関連する脳機能のゆらぎと安定化”, 2022 年 4 月−2023 年 3 月, (600,000 円)