

知覚・認知トレーニングによる認知機能の向上

Brendan Parsons¹、Tara Magill²、Alexandra Boucher³、Monica Zhang²、Katrine Zogbo⁴、Sarah Bérubé³、Olivier Scheffer²、Mario Beauregard⁵、Jocelyn Faubert¹

要約

3次元複数対象追跡(3D-MOT)は、3次元仮想環境を用いた知覚・認知トレーニングシステムである。本研究は、3D-MOTが注意力、作業記憶、視覚情報処理速度にもたらす効果について、標準母集団を対象に機能的脳画像法を利用して調べた初めての研究である。大学学齢期の学生20名を集めて、トレーニング(NT)群と非アクティブ対照(CON)群に分けた。神経心理検査を用いて認知機能の評価を行い、定量的脳波検査(qEEG)によって脳機能の相関を評価した。その結果、3D-MOTトレーニングを10回実施することにより注意力、視覚情報処理速度、作業記憶が向上し、さらに安静時における脳の神経電気活動に定量化可能な変化が生じることが示された。

キーワード

複数対象追跡(MOT)、認知機能向上、脳トレーニング、注意力、定量的脳波検査(qEEG)

受理: 2014年7月30日、改訂2014年9月7日、2014年11月5日、認可: 2014年11月17日

序文

認知機能向上は急速に関心が高まっている分野で、その範囲は臨床的障害(注意欠陥多動性障害など)の治療から、健常者、プロスポーツ選手、CEOらの能力向上や、高齢化社会における老化対策にまで及ぶ。有効性が確実に証明されたとは言えない状況にもかかわらず、コンピュータを利用したトレーニングプログラムだけでも、2012年における市場規模は10億ドルを超えている¹。

介入方法としては、さまざまなものが提案されており、紙と鉛筆を使った基礎的な課題(数独パズル、クロスワードなど)、より高度なコンピュータゲーム/テレビゲーム方式のプログラム(Lumosityなど)、脳コンピュータインタフェース(ニューロフィードバックなど)、栄養補助食品(オメガ3脂肪酸、カフェインなど)、興奮剤や向知性薬といった薬物(リタリン、ヌビジルなど)のように多岐にわたっている。低侵襲的な認知機能向上法としては、栄養、運動、睡眠などに関する適切な生活習慣の確立がある。

各介入方法について賛否両面で多くの議論が行われており、あえて言うならば、それぞれに何らかの問題がある。詳細については、参考文献として、Dreslerら²、Jakら³、Academy of Medical Sciencesの特別報告書⁴、及びGruzelić⁵を読みたい。上記介入方法に対する一般的な不満として、転移効果が認められない場合があること、効果の持続時間が不十分なこと、侵襲

的な方法のため重大な副作用の危険性があること、多大な金銭的・時間的投資を要すること、そして、実践する上で倫理的な問題があることが挙げられる。個々の認知機能向上ツールの徹底分析は本論文では対象外とするが、個別の向上法に対する全般的な評価を表1に示す。表から分かるように、大半の方法には、広範な使用を支持するような研究がほとんど存在しておらず、確定的な結論に達するにはさらに多くの研究が必要となる。

このような制約を考慮すると、認知機能向上における至適基準とは、以下のような介入方法になると予想される。(a)強い転移効果が認められる、(b)副作用や毒性リスクがない、(c)時間的・金銭的投資が最小限に抑えられる、(d)持続的な効果が認められる、

(e)倫理的問題がない、(f)他の方法と併用可能である。さらに、その方法は(g)実質的にいかなる集団にも適用できるものでなければならない。本研究の目

1カナダ、ケベック州モントリオール、モントリオール大学検眼学校

1カナダ、ケベック州モントリオール、マクギル大学心理学部

1カナダ、ケベック州モントリオール、モントリオール大学心理学部

1カナダ、ケベック州モントリオール、コンコルディア大学心理学部

5アメリカ合衆国、アリゾナ州トゥーソン、アリゾナ大学心理学部

責任著者:

Brendan Parsons、モントリオール大学検眼学校、3744 Rue Jean-Brillant, Bureau 260-01, Montreal, Quebec, H3T 1P1, Canada

Email: psybrendan@gmail.com

表 1 各種の認知的介入法に対する全般的な評価

	筆記	コンピュータゲーム	脳コンピュータ インタフェース	栄養補助食品	興奮剤および 向知性薬
1. 強い転移効果	不定 ³	不定 ^{2, 3}	あり ⁵	あり ²	不定 ^{2, 4}
2. 副作用/毒性	報告なし	有意でない ³	有意でない ⁵	有意 ^{2, 4}	有意 ^{2, 4}
3. 時間的投資	継続的 ³	20 時間以上 ³	10 時間以上 ⁵ 、 30~40 時間	継続的 ^{2, 4}	継続的 ^{2, 4}
4. 持続的効果	未報告	不明 ³	あり ^{5, 6}	なし ² 、許容範囲 ²	なし ^{2, 4}
5. 倫理的問題	報告なし	報告なし	報告なし	報告なし	あり ^{2, 4}
6. 相互排他性	禁忌報告なし	禁忌報告なし	禁忌報告なし	禁忌が存在 ⁴	禁忌が存在 ⁴
7. 適用可能な集団	健康高齢者 ³	多様	多様 ^{5, 6}	多様 ⁴	多様 ^{2, 4}

的は、このような至適基準を知覚・認知トレーニング 3D-MOT の介入により実現するための予備的証拠を提示することである。

3D-MOT

3次元複数対象追跡 (3D-MOT) は、モントリオール大学の Dr. Jocelyn Faubert が作成した知覚・認知トレーニングプログラムである⁷。当初、研究用ツールとして Pylyshyn & Storm⁸によって考案された複数対象追跡 (MOT) 課題が、その後 NeuroTracker⁷と呼ばれるトレーニングツールに応用された。このツールはこれまで、高齢者の生体運動の知覚を改善する目的で使用されている他^{10, 11}、運動パフォーマンスレベルと MOT 課題における学習能力との関連付けが行われている^{7, 9}。

3D-MOT は、認知機能向上法として、至適基準に不可欠な 4 つの決定的な特徴がある。まず、トレーニングには (a) MOT、(b) 広い画面 (c)、3D 双眼鏡を使用する。これらはすべてトレーニングの生態学的妥当性に資するものである。我々は日々、3次元の知覚フィールド全体にわたり (広い画面及び 3D 双眼鏡)、無関係な情報を抑制しつつ適切な複数の情報源に注意を払う (MOT) 必要がある。トレーニングは、速度閾値を用いることで適応的なものとなっており、発達の最近接領域内に難易度が一貫して維持される。

また、MOT 課題は、認知能力の訓練において基本となる 2 つの原則に従っている (詳細については、Faubert & Sidebottom⁷を参照)。第一に、課題は基本的なもので複雑な戦略は必要なく、低水準の認知システムを必要とする。第二に、トレーニングでは、常に現在の機能レベルもしくはそれを上回るレベルを達成するよう求められる。このように、3D-MOT トレーニングの背後にある原則は分離と過負荷である。

この場合、分離とは、課題に必要な機能の数を限定し、一定にすることを意味する。トレーニング課題は、認知機能をランダムに一

機能への過負荷とは、機能に対し現在の能力を上回る要求を行うことを意味する。任意の機能を適切に訓練するためには、順応 (脳内：神経可塑性) が起こるように過負荷をかける必要がある。あらゆる学習パラダイムにおいて、過負荷は発達の最近接領域に収まる範囲内に、確実に維持されなければならない¹²。速度閾値に応じて、適切な過負荷レベルが確保されている。

認知機能

3D-MOT に関与する認知機能は (a) 注意力、(b) 作業記憶、(c) 視覚情報処理速度であると想定される。理由については、「方法」の節で課題を説明する際に明らかにした上で、「考察」でもさらに説明を行う。各機能の作業定義は、表 2 に示す。

ここで、上記認知機能は 3D-MOT トレーニング 10 セッション実施後に有意な改善を示す、と仮定する。また、これら認知機能のパターンに一致する脳機能の定量的変化も認められるはずである。すなわち、低周波数の脳波に比べてベータ波が増加し、後頭皮質でガンマ波が増加することが予想される。

方法

モントリオール大都市圏で大学学齢期の学生 20 名を集め、3D-MOT トレーニング (NT : n = 10) 群と対照 (CON : n = 10) 群に無作為に割り付けた。両群は同年齢の中等後教育を受けており (NT = 4.40 ± 1.35 年、CON = 4.40 ± 1.17 年)、ほぼ同年齢であった (NT = 23.54 ± 2.56 歳、CON = 23.02 ± 2.78 歳)。向精神薬の服用者や、認知障害と診断された者は含まれていなかった。本プロジェクトは、モントリオール大学倫理委員会 (CERES : Comité d'éthique de la recherche en santé) の承認を得た。レベルの高いスポーツ選手は、本課題における学習能力が高いため、標本に含まなかった⁹。

貫性なく組み合わせて実施するべきではない。分離を行わない場合、トレーニング効果は減少する。

表 2 3D-MOT に関与する認知機能^a

認知機能	定義
注意力	
持続的注意力	選択的注意を持続する能力
選択的注意力	指定の対象に関心を向ける／集中する／認知的に処理する能力
分割的注意力	一度に複数の対象に選択的な関心を向ける（多焦点）能力
抑制力	指定の対象に関心を向けない／集中しない／認知的に処理しないようにする能力
短期記憶	短いタイムスパン（20～30 秒）にわたって情報を保持する能力
作業記憶	短いタイムスパンにわたって情報を保持および変換する能力
情報処理速度	知覚刺激を意識的に統合させるのに要する時間

^a 出典：Banich & Compton¹³

評価

すべての被験者が同一の初回テストおよび最終テストを受けた。テスト時間は 2 時間～2 時間半であった。テストは定量的脳波検査（qEEG）、神経心理検査バッテリー、3D-MOT セッションで構成されていた。神経心理検査では、視聴覚媒介連続動作性テスト（IVA+Plus CPT：www.braintrain.com）、記号探し、符号、積木模様、数唱、語音整列、空間スパンの下位検査を含むウェクスラー成人知能検査第 3 版（WAIS-III）¹⁴、d2 注意検査法^{15, 16}、デリス-カプラン実行機能検査（D-KEFS）の色彩言語干渉テスト¹⁷などを行った。評価テストのうち 3D-MOT の部分は、後述するトレーニングセッションと同一であった。

IVA+Plus は、コンピュータを使用して注意力を測定する持続処理課題である。この課題では、被験者は視覚的および聴覚的に提示される標的刺激の「1」という数字を認識したら、マウスの左ボタンをクリックするよう指示される。標的刺激に紛れて、非標的刺激として数字の「2」が視覚的および聴覚的に提示されるが、被験者はこの刺激に反応しないよう指示される。本課題は約 20 分間継続して行われる。

WAIS-III の記号探しは、視覚情報処理速度テストである。筆記で行われ、被験者は 2 種類の標的記号の後ろに 5 つの記号が並んでいるものを見せられる。「はい」か「いいえ」で回答するよう指示される。5 つの記号の中に、2 つの標的記号のいずれか 1 つが含まれていれば、「はい」を選ぶ。

WAIS-III の符号も、視覚情報処理速度を測る筆記課題である。符号の課題では、ページ上部に並ぶ 1 から 9 までの各数字に、記号が割り当てられている。下部には、1 から 9 までの数字が枠内にランダムに並んでおり、その下に空欄がある。被験者は、各数字に対応

赤と白で塗られた面が 2 面となっている。各模様について被験者に見本が提示され、被験者はできるだけ早く再現しなければならない。最初の 5 つの模様には 4 個の積木を、最後の 5 つの模様には 9 個の積木を使用するようになっていく。

WAIS-III の数唱は、聴覚的短期記憶および作業記憶を測定するテストである。被験者に一連の数字を読み聞かせた後、その数字を復唱させる。最初に、被験者は読み上げられた数字列を同じ順序で繰り返す。次に、新たな数字列を用いて課題を繰り返すが、今度は一連の数字を逆の順序で復唱する。数字列には難易度があり、1 段階上がるごとに長さが 1 桁増えていく。

WAIS-III の語音整列は、聴覚的作業記憶の課題である。数唱に似ているが、各語音列には文字が加わっている。また、被験者は読み上げられた数字と文字について、先に文字をアルファベット順に並べ替え、続いて数字を昇順に並べ替えて答えるよう求められる。

WAIS-III の空間スパンは、視覚的短期記憶および作業記憶の課題である。10 個の同じ立方体を乗せた長方形の板を使用する。立方体には番号が付いており、試験官からは番号で立方体を見分けることができるが、被験者は位置のみで判断しなければならない。被験者は、試験官が示した順番に従い、正しい順序で積木に触れていく。数唱課題と同様、立方体の課題は 2 つずつレベル分けされており、積木が 1 個増えると次のレベルになる。

d2 注意検査法は筆記タイプのテストで、被験者は錯乱肢に混在する標的刺激を、線で消す。標的には、小文字の「d」の上に縦線 2 本、または小文字の「d」の下に縦線 2 本、あるいは小文字の「d」の上下に縦線が 1 本ずつ表示されている。錯乱肢には、小文字の「d」と「p」の上下に 1～4 本の縦線が表示されており、縦線の数は上下最大各 2 本である。

する記号を、数字の下に設けられた空欄に記入する。

WAIS-IIIの積木模様は、視空間能力に関する課題である。被験者は示された模様を、積木を使って再現するよう求められる。各積木は、赤1色の面が2面、白1色の面が2面、半分ずつ

D-KEFSの色彩言語干渉テストは、4つの下位検査から成る視覚抑制検査である。各下位検査には時間制限があり、誤りを訂正できなかった数と正しく訂正できた数が記録される。下位検査では、赤、青、緑の3色の中から1色を回

表3 3D-MOT 試験^a

段階	内容	時間
提示 (a)	8個の球体が現れる。球体はすべて黄色。	2秒
印付け (b)	ターゲット球体4個が赤色に変わり、周囲に白い輪が表示される。	2秒
小休止	ターゲットが黄色に戻り、再びすべての球体が同色となる。	2秒
移動 (c)	すべての球体が3次元立方体の中を直線的に移動する。別の球体や立方体の壁面に接触すると、跳ね返って別の方向に移動を続ける。	8秒
回答 (d)	8個すべての球体が動きを止め、それぞれに番号が付けられる (1から8)。被験者は口頭で回答する。	ユーザーにより異なる
フィードバック (e)	ターゲット球体が明らかにされ、結果 (正解したターゲット球体数) のフィードバックが行われる。	2秒

^a各段階の略図については、図1を参照。

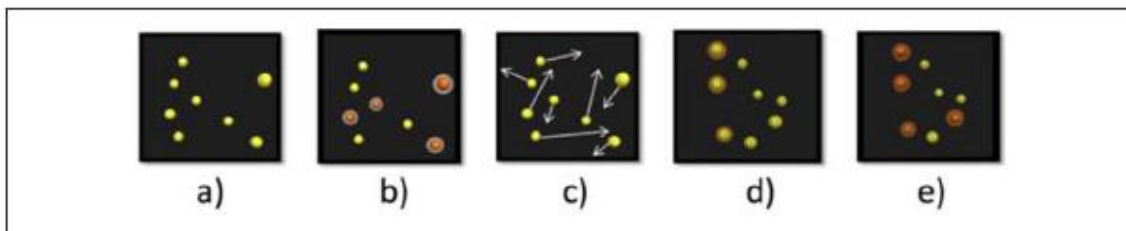


図1 3D-MOT 試験の各段階

答する。各下位検査は、刺激がリスト形式で示され、被験者はページを左から右、上から下に読み進める。5項目2行から成る見本の下に、10項目5行の制限時間付きテストが記載されている。最初の下位検査は色名称呼で、被験者は色の付いた正方形を見て色名をそのまま回答する。次は色名単語の読みで、被験者は黒インクで印刷された色名を読む。その次は抑制で、被験者は各項目に書かれている文字ではなく、インクの色を回答しなければならない。最後の下位検査は抑制/切り替えで、被験者は各項目に書かれている文字ではなく、インクの色を回答しなければならないが、項目が四角い枠で囲まれている場合には、書かれている文字を読まなければならない。

注意すべき点は、実施する検査の一部は、特に学習や練習という再検査効果の可能性があるため、一般的に短い間隔では再実施しないことである。本研究の期間からすると、再検査効果が最も生じやすいテストは、WAIS-IIIのすべての下位検査¹⁴およびD-KEFS色彩言語干渉テスト¹⁷である。対照群

トレーニング

NT群では、すべて同じトレーニングセッションを行い、各回の速度と正解したターゲット数を記録した。各セッションの所要時間は45分~1時間で、午前9時から午後5時までの時間帯に、毎週2回のセッションを5週間にわたり実施した。CON群は非アクティブ対照群であった。

トレーニングセッションでは、試験20回を1セットとして3セットを行う。試験では、被験者は4個の球体ターゲットを追跡するが、ターゲットは全く同じ4個の錯乱肢とともに、3次元立方体の中を直線的に移動する。96×96インチのプロジェクタスクリーン上に、立方体を投影した。立法体は1辺1.5m、ターゲットは直径10cmであった。各試験の速度はメートル毎秒で計測され、初回の開始速度は0.3メートル毎秒であった。実施方法に関するその他すべての詳細は、Faubert & Sidebottom⁷を参照のこと。

各試験の最初の段階では、8個の球体はすべて黄色で現れ、静止している。次に、追跡

を用いることにより、このような効果を考慮した適切な調整が可能になると思われる。

qEEG データは、Mitsar 202 システム (www.mitsar-medical.com) を 500 Hz で用いて、拡張 10-20 法で測定を行ったが、今回の分析には通常の 10-20 電極配置法¹⁸のデータのみを使用した。WinEEG (www.mitsar-medical.com) を用いて記録したデータを、qEEG の標準データベース NeuroGuide¹⁹を利用して分析した。

しなければならない 4 個のターゲット球体が 2 秒間赤くなり、再び黄色に戻る。球体が移動を開始するので、8 秒間の追跡を行う。球体は、8 個すべてが立方体の中で直線的に移動する。球体が障害物に遭遇すると、その障害物に当たって跳ね返り、別の方向に移動を続ける。この段階の終了時に、各球体に番号が付けられ、被験者が口頭でターゲットを回答する。

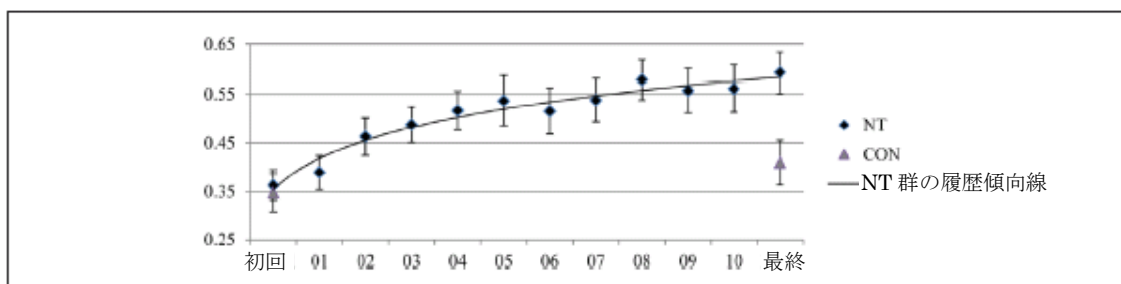


図 2 NT (トレーニング) 群および CON (対照) 群の 3D-MOT セッションスコア：幾何平均 (標準誤差)。CON 群の最終テスト時スコアは、NT 群の第 1 回トレーニングセッションと統計的に類似している。初回テスト時スコアは NT 群が 0.36、CON 群が 0.35。標準誤差はそれぞれ 0.03 と 0.04 であった。NT 群の第 1 回トレーニングセッションが 0.4 (標準誤差 0.03) であったのに対し、CON 群の最終テスト時セッションは 0.41 (標準誤差 0.05) であった。

3D-MOT 試験の各段階については、表 3 に概要をまとめ、図 1 に略図を示す。

4 個のターゲットすべてを正解すれば、次の試験では速度が上がる。回答が間違っていれば、次の試験の速度は下がる。速度の変化は適応階段法に基づいており、最初の変化をより大きくすることで、トレーニング最適ゾーンに素早く到達できるようになっている。理想は、発達の最近接領域を維持するため、試験の大部分を現在の能力レベルもしくはそれをわずかに上回るレベルで行うことである。持久力と疲労について調整した上で、適応階段法^{9, 10}によりこれを実現している。20 回の試験終了時に、最終速度閾値スコアが表示される。被験者のセッションスコアは、20 回 3 セットの平均閾値スコアとなっている。4 個のターゲットを使用した理由は、一般に、同様の状況において大多数の人が 4 つの対象を追跡できるためである²⁰。

データ分析

すべての神経心理検査の評価と EEG の分析は、筆頭著者が行った。標準データベース NeuroGuide (2013 年度版、バージョン 2.7.9) を利用して、盲検デザインに則り、アーチファクトがない 1 分間のデータを著者が選択した。試験—再試験信頼性係数および折半法信頼性係数は 0.90 以上を維持した。

($P < 0.01$)。図 2 に、両群のセッションスコアおよび NT 群の履歴傾向線を示す。

認知機能

ルビーン検定を行ったところ、トレーニング前の両群間の等質性に有意差は認められなかった ($P > 0.01$: WAIS の語音整列のみ、 $P < 0.05$ で有意であった)。初回結果の分散分析により、トレーニング前の精神心理検査に関して、両群の間に有意差はないことが示された。また、トレーニング条件 (トレーニング群または対照群) を被験者間要因として反復測定分散分析も行った。トレーニングの主効果が認められ ($F = 36.232$; $P < 0.01$)、トレーニングと群の交互作用も認められた ($F = 13.201$; $P < 0.01$)。認知機能に関する演繹的仮説の結果として、計画的事後 t 検定を用いて、トレーニング前後の神経心理検査の比較を行った。本研究は実験的であり、使用した統計的検定もそれほど厳格では無いため、有意性を得るために $P < 0.01$ という厳格な α エラーが要求された。トレーニング前後の検査の平均値、変化度、計画的 t 検定の結果を表 4 に示す。

NT 群は、IVA+Plus 聴覚、WAIS 記号探し、WAIS 符号、WAIS 積木模様、WAIS 語音整列、d2 注意検査法、そして D-KEFS の下位検査である色名呼称、抑制、抑制/切り替えにおいて、有意に高いスコアを示した (P

結果

3D-MOT

予想通り、NT 群の 3D-MOT セッションスコアは、初回テストから最終テストまでに有意な改善 ($P < 0.01$) が見られた。また、興味深いことに、CON 群でも初回テストと最終テストの間に大幅な改善 ($P = 0.016$) が見られた。両群の最終セッションスコアには有意な差がある

< 0.01)。また、NT 群が有意傾向を示したものに、IVA+Plus 視覚、WAIS 空間スパンなどがある ($P < 0.1$)。IVA+Plus の個々の下位尺度については、視覚的一貫性 ($P < 0.01$) と聴覚速度 ($P < 0.01$) で有意な改善が見られた。また、聴覚持久力 ($P < 0.05$)、聴覚集中 ($P < 0.05$)、視覚速度 ($P = 0.068$) では有意傾向を示した。

CON 群に関しては、D-KEFS 下位検査の抑制/切り替えのみで有意性が認められ、WAIS 符号、WAIS 積木模様、d2 注意検査法、D-KEFS 下位検査の抑制では有意傾向が見られた ($P < 0.1$)。

表 4 神経心理検査の結果：トレーニング前後の群内 t 検定

検査方法	NT 群 (n=10)				CON 群 (n=10)			
	トレーニング前	トレーニング後	変化度	有意性	トレーニング前	トレーニング後	変化度	有意性
IVA+Plus—聴覚	93.40	101.58	8.18 ^a	.007	97.30	98.98	1.68	
IVA+Plus—視覚	97.57	104.60	7.03 ^b	.071	97.80	97.92	1.12	
WAIS—記号探し	43.40	48.40	5.00 ^a	.004	45.50	49.40	2.90	
WAIS—符号	91.40	101.10	9.70 ^a	.000	88.00	95.50	7.50 ^b	.015
WAIS—積木模様	51.20	59.20	8.00 ^a	.000	56.10	58.60	2.50 ^b	.024
WAIS—数唱	20.00	19.90	-0.10		19.60	19.70	0.10	
WAIS—語音整列	13.90	15.70	1.80 ^a	.008	12.20	13.30	1.10	
WAIS—空間スパン	19.40	22.20	2.80 ^b	.021	19.00	20.60	1.60	
d2 注意検査法	437.70	498.10	60.40 ^a	.000	465.10	509.30	44.20 ^b	.017
D-KEFS 色名呼称	27.30	23.60	-3.70 ^a	.006	24.90	24.40	-0.50	
D-KEFS 色名単語の読み	20.00	18.10	-1.90		19.10	19.30	0.20	
D-KEFS 抑制	43.80	38.40	-5.40 ^a	.004	44.10	40.20	-3.90 ^b	.020
D-KEFS 抑制/切り替え	49.50	42.80	-6.70 ^a	.004	50.80	45.60	-5.20 ^a	.009

略語：IVA (視聴覚媒介連続動作性テスト)、WAIS (ウェクスラー成人知能検査)、D-KEFS (デリス-カブラン実行機能検査)

^a $P < 0.01$ であれば有意

^b $P < 0.1$ であれば有意傾向

表 5 3D-MOT トレーニング後の神経心理検査における認知機能の改善

認知機能	検査方法
注意力	
持続的注意力	IVA+Plus (一貫性及び集中 ^a)、WAIS (記号探し)、d2
選択的注意力	IVA+Plus (持久力 ^a 、一貫性、集中及び持続的指数)、d2
分割的注意力	d2 注意検査法、D-KEFS (抑制/切り替え)
抑制力	D-KEFS (抑制及び抑制/切り替え ^b)
短期記憶	該当なし
作業記憶	WAIS (空間スパン ^a 及び語音整列)
情報処理速度	IVA+Plus (速度 ^a)、WAIS (記号探し、符号、積木模様)、d2、D-KEFS (色名呼称及び色名単語の読み)

^a 有意傾向を示している。

^b 「D-KEFS 抑制/切り替え」は、CON 群でも有意な改善が認められた。

初回の IVA+Plus 検査で視覚領域に高いスコア (97.57) が出たため、聴覚領域 (93.40) よりも顕著な天井効果が生じた。これによって、視覚注意力の比較が有意ではなく有意傾向となった可能性があり、トレーニング後も視覚注意力スコアは高水準のままであった (104.60、聴覚は 101.58)。

は有意な変化なし、青は $P < 0.05$ 、赤は $P < 0.001$ の変化を表す。右側の画像の色は変化の方向を示しており、青は低下を、黄色 - 赤は上昇を表す。

周波数帯域に関する共通認識が存在しないため、筆者らは具体的な個々の周波数について論じていく。整合性を図るため、NeuroGuide データベースで定義されている

表 5 には、評価を行った各認知機能についてまとめており、有意な改善が認められた検査を示している。これについては、「考察」の節で詳細に論述する。

定量的 EEG

認知機能の変化について仮説を立てた際、qEEG に特異的な変化が起こることが予想された。下図は、NT 群のトレーニング後に行った qEEG 分析における有意差を示している。左側の図は、計画的に実施した対応のある両側 t 検定の結果を示し、右側の図はトレーニング前後における EEG パワー値差異率の変化方向を示す。左側の図は変化の有意度を示しており、白

周波数帯域を参照する。NeuroGuide の周波数帯域は、デルタ波 (1~4 Hz)、シータ波 (4~8 Hz)、アルファ波 (8~12 Hz)、ベータ波 (13~30 Hz)、ガンマ波 (30~50 Hz) である。

デルタ波、シータ波、アルファ波の減少。仮説を立てた通り、NT 群はシータ波およびアルファ波の周波数帯域において、パワーの有意な絶対的減少が認められた。また、デルタ帯域も、やや少ないながらも有意な減少を示した。具体的には、減少が確認されたのは閉眼時が 2~11 Hz 全体、開眼時は 2 Hz、5~6 Hz、10~11 Hz であった。変化は主に、前頭葉 (電極 FP1、Fp2、F7、F3、Fz、F4、F8、C3、Cz、C4) に現れた。

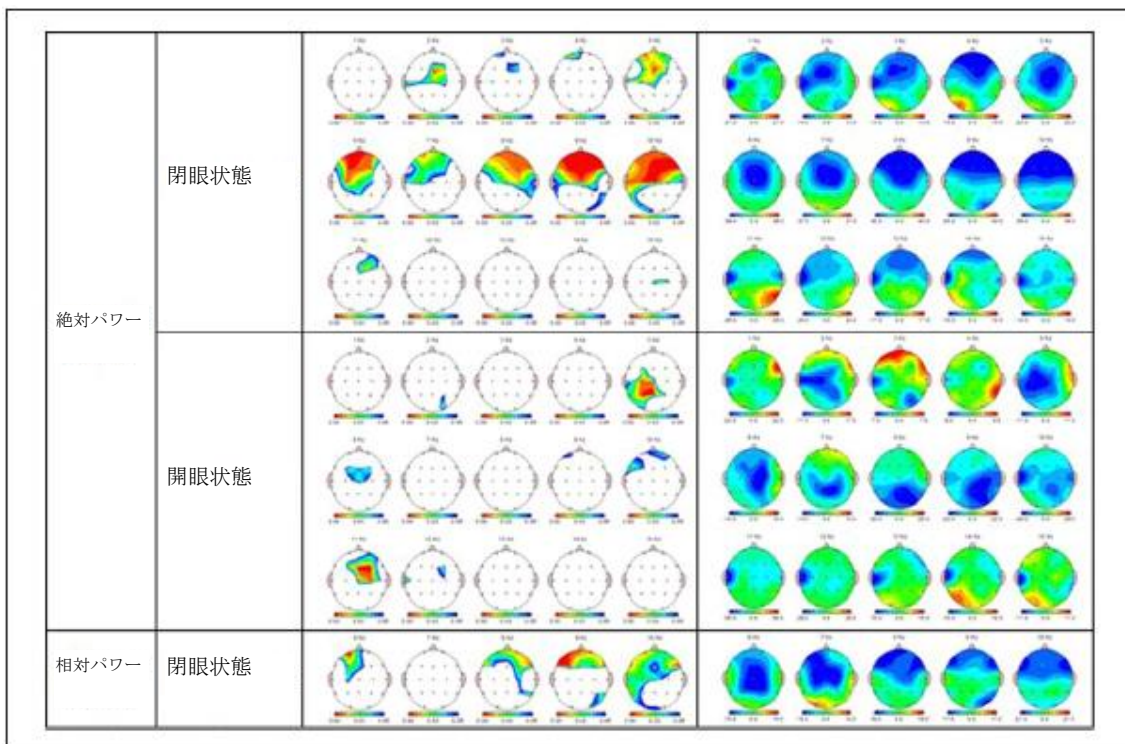


図 3 トレーニング前後のデルタ波、シータ波、アルファ波の振幅の変化。有意な変化のみを示すため、帯域部分を切り取った。補足図に完全な qEEG 地図を示す (<http://eeg.sagepub.com/content/by/supplemental-data> に掲載)。

シータ波の変化も頭頂葉皮質全体で確認できたが、左大脳半球 (P3、Pz) が最も顕著であった。これらの変化を図 3 にまとめている。CON 群はこの傾向を示さなかった。

ベータ波の増加。徐波パワーの減少という仮定を受け、高ベータ波がより優勢になることが予想されていた。予想通り、NT 群ではベータ帯域内のさまざまな周波数において、具体的には閉眼時の 14 Hz、16~18 Hz、22~40 Hz および開眼時の 20~23 Hz、28 Hz、

5 に示したように、40~50 Hz 帯域で、後頭部位および頭頂部位 (O1、O2、Pz、P4) に有意な増加が見られた。興味深いことに、図 4 にも示されているように、閉眼時に予想外の傾向が現れた。同じ帯域で前頭部位全体 (Fp1、Fp2、F3、Fz、F4、Cz) に有意な増加が見られたのである。実は、CON 群では逆に、開眼時に O1 および O2 でガンマパワー値の減少が認められていた。なお、閉眼時には有意差はなかった。

34 Hz、37~39 Hz において、有意な相対パワー値の増加が認められた。これらは前頭部全体 (Fp1、Fp2、F7、F3、Fz、F4、F8、C3、Cz、C4) で見られた変化であり、図 4 にそれを示している。変化が相対パワースペクトル値に限定されていた (絶対パワー値の該当周波数では有意な変化が見られなかった) ことから、これらの増加は他の周波数における減少の結果であり得ると慎重に解釈する必要がある。またしても、CON 群に同様の変化は認められなかった。

ガンマ波の増加。最後に提示した仮定は、NT 群ではガンマ帯域において、特に後頭部位で有意な増加が見られるであろうというものであった。この変化は開眼時に認められた。図

その他の有意な変化。その他には、注意理論に適合する有意な変化は認められなかった。各検査条件の完全な qEEG 地図を、補足図に示す (<http://eeg.sagepub.com/content/by/supplemental-data> に掲載)。

考察

3D-MOT

予想された通り、課題において NT 群は継時的に改善し、最終セッションスコアでも改善が認められた。本研究では持続期間の評価は行わないうが、確認された効果が持続し得ることを示す結果となっている。これは、CON 群の初回および最終テスト時における 3D-MOT セッションスコアの改善状況で証明されている。CON 群は 7 週

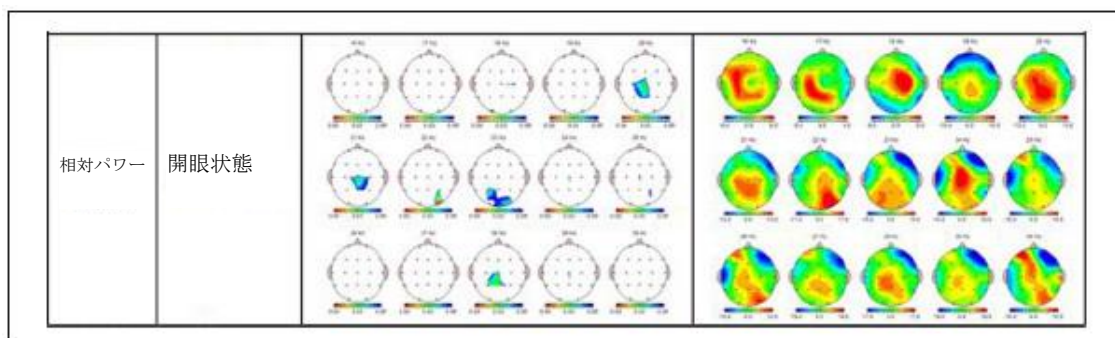


図 4 トレーニング前後のベータ振幅の変化。有意な変化のみを示すため、帯域部分を切り取った。補足図に完全な qEEG 地図を示す (<http://eeg.sagepub.com/content/by/supplemental-data> に掲載)。

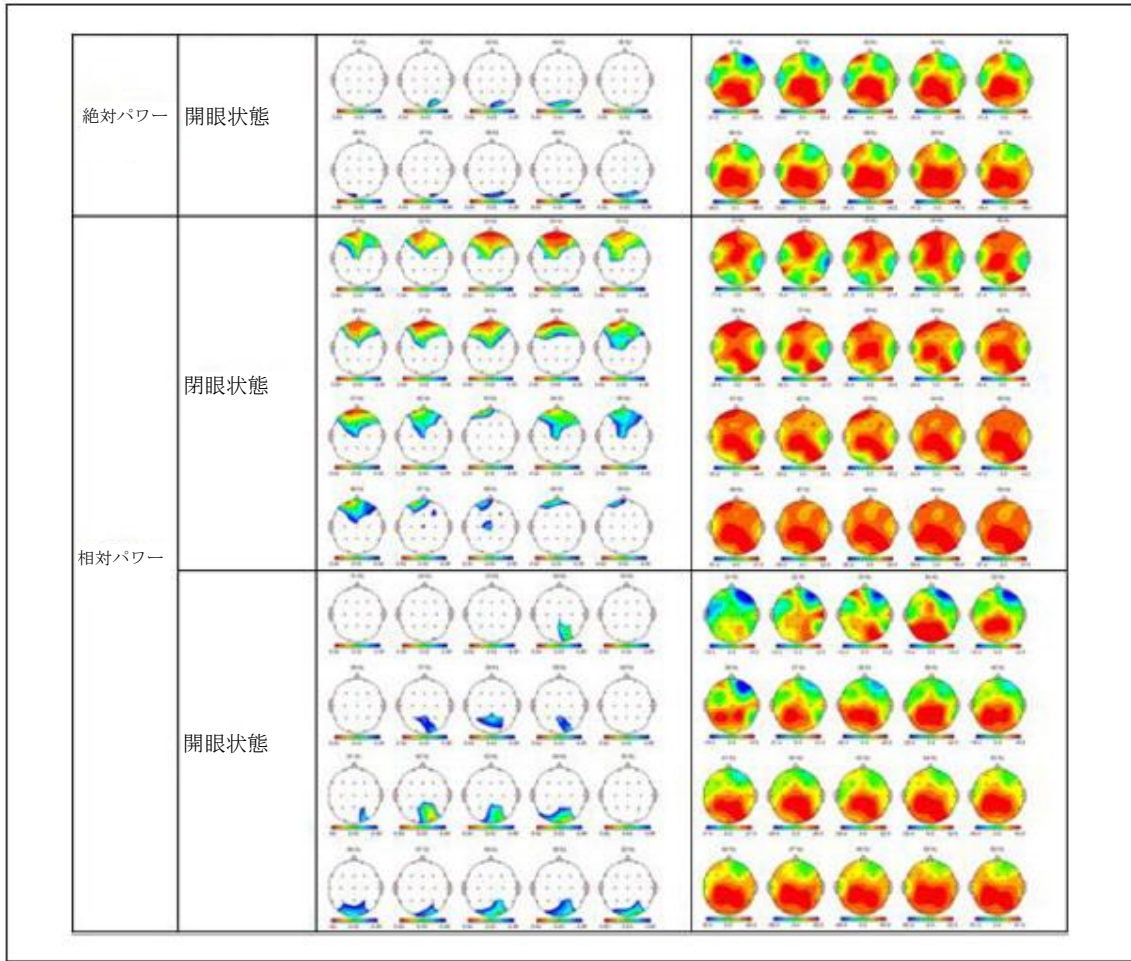


図5 トレーニング前後のNT群のガンマ振幅の変化。有意な変化のみを示すため、帯域部分を切り取った。補足図に完全なqEEG地図を示す (<http://eeg.sagepub.com/content/by/supplemental-data> に掲載)。

表 6 認知機能向上法の至適基準としての 3D-MOT

基準	状況	詳細
1. 強い転移効果	あり	注意力、作業記憶、視覚情報処理速度。対応する脳機能の変化。
2. 副作用／毒性	有意でない	トレーニング直後に軽度の疲労を生じる場合もあるが、20～30分で消失。
3. 時間的投資	5時間	トレーニングの至適頻度および期間は不明。週1時間で十分。
4. 持続的効果	不明	
5. 倫理的問題	なし	
6. 相互排他性	不明	今後の研究でトレーニングの併用について調査。禁忌は確認されていない。
7. 適用可能な集団	既知	健常者、健常高齢者、スポーツ選手
	不明	臨床領域

間を経て有意に改善しており、同群のセッションスコアはNT群による最初の2回のセッションのものに類似している。セッションの間隔が7週間あったにもかかわらず、CON群は初回テスト時セッションの効果を定着・持続できているものと思われる。

認知機能

注意力。3D-MOT課題で最も多く求められるものは注意資源であり、10回のトレーニングセッションによって持続的注意力、選択的注意力、分割的注意力ならびに抑制力が向上するという結果が示された。注意力は本質的に知覚が認識に至る上での入口であり、我々が何を見、聞き、感じ、味わい、嗅ぐのかを「決定」している。注意力は学習能力および他人とのコミュニケーション能力を調整しており、人間の心や意識の基本要素となっている^{21, 22}。

3D-MOTは純粋に視覚的なものであるため、「なぜ聴覚領域に改善が見られるのか？」という疑問が生じる。Wickens²³によると、さまざまな感覚様相における注意容量は、共通の資源プールによって上限が決まっている。例えば、複雑な視覚処理を行っている時（複雑な状況での運転時など）には、聴覚課題（会話を続けることなど）がより困難になる²⁴。この共有プールという土台が改善した時に、プールを共有するすべての感覚様相に改善が見られるというのは理にかなっている。

持続的注意力。従来、持続的注意力課題では、比較的長時間にわたり注意力を維持することが要求されてきた。3D-MOT課題はこれとは異なり、セッション1回の時間は約30分間である。さらに、持続的注意力課題は、コマ数秒間のわずかな変化にも配慮が必要なものでなければならない。3D-MOTの「移動」段階は1回の試験にわずか8秒間しかないが、4個すべてのターゲットに対し常に注意力を維持しておく必要がある。ターゲットを見失ってしまうと、取り返しがつかない。ごくわずかな注意力の低下が、試験の失敗につながる。

選択的注意力。また、トレーニングでは、錯乱肢ではなくターゲットに選択的に集中しなければならない。試験の速度が上がるにつれ、ターゲットと錯乱肢が相互に影響し合う機会も増える。注意資源の配分は、流動性を保たなければならない。錯乱肢の近くにあるターゲットには、比較的孤立しているターゲットよりも多くの注意が必要となる。

抑制力。抑制力は、選択的注意力とは対照的に、関係のない情報に集中しないようにする能力である。両者は異なる構成概念だと考えられているが、相補的なプロセスである²⁵。3D-MOTでは、恒常的に抑制力が要求される。つまり、「移動」段階の間は、ターゲットと錯乱肢が相互に影響し合うことが多いため、錯乱肢に対する集中を抑制しなければならない。

分割的注意力。複数対象追跡では、分割的（多焦点）注意力が重要な役割を果たす²⁶。3D-MOTは、分割的注意力の基本原則である、複数対象間でダイナミックに注意を移動させる能力をトレーニングする²⁷。

短期記憶および作業記憶。短期記憶は、限られた量の情報を意識の中に一時的に保持する能力である²⁸。作業記憶は、一時貯蔵庫に格納された情報を、目の前の課題に合わせて処理する能力である²⁹。先行研究では、短期記憶と作業記憶の間には強い関連性があるとされており、多くの場合、短期記憶は作業記憶の限定要因であると仮定されている²⁸。作業記憶は高次タスクであり、実行機能に必要な前提条件だと考えられることが多い³⁰。作業記憶に関しては、注意力の重要性が指摘されており、注意力障害集団では作業記憶の欠如が見られる³¹。

3D-MOTでは、ターゲットの動きを内部で処理しながら（作業記憶）、ターゲットを一時記憶貯蔵庫に保持しなければならない（短期記憶）。課題により注意力が改善することで、作業記憶に影響が及ぶ可能性もあるが、課題が直接作業記憶を改善する可能性もある。聴覚的作業記憶においても視覚様相と同様の改善が見られることから、改めて、共有

資源が作用しているものと思われる。Saults & Cowan³²の研究

が共有資源プールを立証している。

視覚情報処理速度。知覚刺激は、まず感覚器から入って一次処理領域に転送され、次に高次処理領域である「連合野」に転送される。この「ボトムアップ型」転送が行われる速度が視覚情報処理速度であり、意思決定時間および反応時間に影響を及ぼしている可能性がある³³。

速度閾値は、直接的に視覚情報処理速度を最大限まで引き上げる。先行研究⁹により、トレーニングを通じて個人が進歩するにつれ、速度閾値スコアが上昇することが示されている。

定量的 EEG

シータ波／ベータ波と注意力。qEEGを用いた注意力の検査では、注意力障害がある場合、高振幅徐波活動（2～11 Hz）が認められたうえ、高ベータ波活動（12～20 Hz）の相対的な障害が確認されている^{6, 34}。注意力障害への精神刺激薬物およびニューロフィードバックの使用には、過剰な徐波を減少させて不足しているベータ波を増加させるというEEGの正常化作用があり、結果として注意力の改善が認められている^{6, 34, 35}。これらの知見は、本研究で確認された「NT群における注意力の改善は、2～11 Hzの徐波活動の減少および相対的なベータ波の増加に対応していた」という結果と一致している。

ガンマ波、結びつけ、神経可塑性。ガンマ帯域は、EEG分析の分類では比較的新しい³⁶。ガンマ帯域は以前から、脳内の「バインディング（結びつけ）リズム」として、目の前の課題のために認知資源を協調させ動員する役割を担っていると考えられてきた³⁷。ガンマ帯域は、根底にある広域的な皮質協力および視床ペースメーカーによって誘発された位相同期性が反映されており、注意と記憶において大きな役割を果たし、シナプス可塑性において重要な役割を担っているとされている³⁷。

ガンマ帯域で見られる変化は、視覚処理に関わる脳領域である後頭皮質に集中している³⁸。視覚注意力、視覚作業記憶、視覚情報処理速度の並行的改善は、このようにガンマ帯域の増加に現れている。

本研究の限界と今後の研究への提言

本研究では、比較的小規模の標本サイズを使用した。しかし、今回の研究で得られた有望な結果を考慮して、筆者らは被験者数を増加

ング期間を延長して検査—再検査間隔を延長すると、理想的なトレーニング頻度および期間に関する情報の獲得が可能になる。アクティブ対照群を設定することにより、認められた変化が確かに3D-MOTによるもので、非特異的因子によるものではないことを確認できる。その結果、統計的優位性が高まり、3D-MOTで活性化する認知機能および神経基質のさらなる理解につながるものと思われる。

結論

この予備的研究では、3D-MOTが健常者集団の認知機能を改善すること、それに応じて脳機能に変化が認められることが証明された。本研究は、3D-MOTが認知機能向上法の至適基準となるための第一段階である。3D-MOTを使用した5週間のトレーニングで、注意力、作業記憶、視覚情報処理速度に強い効果が現れたことが神経心理検査の評価により示され、それに伴う変化もqEEG測定で確認された。総合的にこれらの結果は、日常生活への転移が認められることを示唆しているが、今後の研究では現実の不確定要素を含めた検証を行う必要があると思われる。副作用は、トレーニング直後に軽度の疲労を生じセッション後20～30分で消失したという事例報告以外には、確認されていない。時間的投資に関しては、週に1時間で十分だが、トレーニングの至適頻度および期間を決定するためにはさらなる研究が必要である。現在のところ、トレーニング効果が長期間持続するか否かは不明である。3D-MOTトレーニングに関する倫理的問題は認められなかった。3D-MOTと別の種類の認知的介入の組み合わせが、より良い結果をもたらす可能性があり、さらなる研究が必要とされている。3D-MOTの禁忌は見られなかった。最後に、適切な集団については、本研究は健常者集団における転移という知見をさらに強化している。今後の研究対象としては、トレーニング後に改善が認められた認知機能に障害が見られる臨床集団がふさわしいと思われる。3D-MOTトレーニングは、注意力、作業記憶および／または視覚情報処理速度に障害のある人、例えば注意欠陥障害^{39, 40}や自閉症スペクトラム⁴¹の人に有効である可能性がある。そこで、表6に本研究で確認された事柄を要約する。

謝辞

して再現することを提案する。転移の検証および検査—再検査効果に関する調整を行うため、さまざまな神経心理検査や脳画像法、さらに日常生活で見られる変化に関する質問票を使用するとよいだろう。セッション数を増加し、トレーニング

本研究の計画および実施にあたりご指導、ご助言、ご支援いただいた Dr. Johanne Levesque に深く感謝申し上げる。

各著者の寄与度

BP はプロジェクトデザインを担当し、トレーニングを実施する研究助手の指導・監督を行い、すべての事前・事後検査を実施し、すべての分析を行った。著者 JF と MB は、監督を行ったほか、研究プロジェクトのデザインに貢献した。TM、AB、MZ、KZ、SB、OS はトレーニングセッションを担当した。B. Parsons が本論文の改訂を担当し、全著者が最終版を承認した。

利益相反の申告

本論文の研究、著者、および／または発表に関する潜在的な利益相反について、以下の通り申告する。BP は、本試験で使用した NeuroTracker 商用版を製造する CogniSens Athletics 社の科学顧問を務めている。JF はモントリオール大学視覚心理物理学・知覚研究所の所長であり、本試験で使用した NeuroTracker 商用版を製造する CogniSens Athletics 社の CSO（最高科学責任者）を務めている。JF は、CSO の立場で同社の株式を保有している。

研究資金

本論文の研究、著者、および／または発表に関して受けた資金援助を、以下の通り開示する。この調査研究は、NSERC Discovery の運営助成金により実現したものである。

参考文献

1. The Economist. Commercializing neuroscience: brain sells. Cognitive training may be a moneyspinner despite scientists' doubts. *The Economist*. August 10, 2013. <http://www.economist.com/news/business/21583260-cognitive-trainingmay-be-moneyspinner-despite-scientists-doubts-brain-sells>. Accessed December 3, 2014.
2. Dresler M, Sandberg A, Ohla K, et al. Non-pharmacological cognitive enhancement. *Neuropharmacology*. 2012;64:529-543.
3. Jak AJ, Seelye AM, Jurick SM. Crosswords to computers: a critical review of popular approaches to cognitive enhancement. *Neuropsychol Rev*. 2013;23:13-26. doi:10.1007/s11065-013-9226-5
4. Academy of Medical Sciences. *Brain Science, Addiction and Drugs*. London, England: Academy of Medical Sciences; 2008. <http://www.acmedsci.ac.uk/index.php?pid=99&puid=126>. Accessed January 11, 2014.

7. Faubert J, Sidebottom L. Perceptual-cognitive training of athletes. *J Clin Sport Psychol*. 2012;6:85-102.
8. Pylyshyn ZW, Storm RW. Tracking multiple independent targets: evidence for a parallel tracking mechanism. *Spat Vis*. 1988;3:1-19.
9. Faubert J. Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes. *Sci Rep*. 2013;3:1154.
10. Legault I, Faubert J. Perceptual-cognitive training improves biological motion perception: evidence for transferability of training in healthy aging. *Neuroreport*. 2012;23:469-473.
11. Legault I, Allard R, Faubert J. Healthy older observers show equivalent perceptual-cognitive training benefits to young adults for multiple object tracking. *Front Psychol*. 2013;4:323.
12. Van Merriënboer JJ, Kirschner PA, Kester L. Taking the load off a learner's mind: instructional design for complex learning. *Educ Psychol*. 2003;38:5-13.
13. Banich MT, Compton RJ. *Cognitive Neuroscience*. 3rd ed. Belmont, CA: Wadsworth/Cengage Learning; 2010.
14. Wechsler DA. *Wechsler Adult Intelligence Scale*. 3rd ed. San Antonio, TX: Psychological Corporation; 1997.
15. Brickenkamp R. *Aufmerksamkeits-Belastungs-Test (Test d2) [The d2 Test of Attention]*. 1 ed. Göttingen, Germany: Hogrefe; 1962.
16. Brickenkamp R, Zillmer E. *The d2 Test of Attention*. Seattle, WA: Hogrefe & Huber; 1998.
17. Delis D, Kaplan E, Kramer J. *Delis-Kaplan Executive Function Scale*. San Antonio, TX: Psychological Corporation; 2001.
18. Jasper HH. The ten-twenty electrode system of the International Federation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1958;10: 371-375.
19. Thatcher RW. *NeuroGuide Manual and Tutorial*. St. Petersburg, FL: Applied Neuroscience; 2008.
20. Fougny D, Marois R. Distinct capacity limits for attention and working memory evidence from attentive tracking and visual working memory paradigms. *Psychol Sci*. 2006;17:526-534.
21. Cohen MA, Dennett DC. Consciousness cannot be separated from function. *Trends Cogn Sci*. 2011;15:358-364.
22. Dijksterhuis A, Aarts H. Goals, attention, and (un)consciousness. *Annu Rev Psychol*. 2010;61:467-490.
23. Wickens CD. Multiple resources and mental workload. *Hum Factors*. 2008;50:449-455.

5. Gruzelier JH. EEG-neurofeedback for optimising performance I: a review of cognitive and affective outcome in healthy participants. *Neurosci Biobehav Rev.* 2014;44:124-141.
6. Arns M, Heinrich H, Stehl U. Evaluation of neurofeedback in ADHD: the long and winding road. *Biol Psychol.* 2014;95:108-115.
24. Wickens CD. Multiple resources and performance prediction. *Theor Issues Ergon Sci.* 2002;3:159-177.
25. Tipper SP, Cranston M. Selective attention and priming: Inhibitory and facilitatory effects of ignored primes. *Q J Exp Psychol.* 1985;37:591-611.
26. Cavanagh P, Alvarez GA. Tracking multiple targets with multifocal attention. *Trends Cogn Sci.* 2005;9:349-354.
27. Spelke E, Hirst W, Neisser U. Skills of divided attention. *Cognition.* 1976;4:215-230.
28. Cowan N. What are the differences between long-term, short-term, and working memory? *Prog Brain Res.* 2008;169:323-338.
29. Baddeley A. Working memory: looking back and looking forward. *Nat Neurosci.* 2003;4:829-839.
30. Carpenter PA, Just MA, Reichle ED. Working memory and executive function: evidence from neuroimaging. *Curr Opin Neurobiol.* 2000;10:195-199.
31. Barkley RA. Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: constructing a unifying theory of ADHD. *Psychol Bull.* 1997;121:65-94.
32. Saults JS, Cowan N. A central capacity limit to the simultaneous storage of visual and auditory arrays in working memory. *J Exp Psychol Gen.* 2007;136:663-684.
33. Vernon PA, Jensen AR. Individual and group differences in intelligence and speed of information processing. *Pers Individ Diff.* 1984;5:411-423.
34. Serman MB. EEG markers for attention deficit disorder: pharmacological and neurofeedback applications. *Child Study J.* 2000;30:1-24.
35. Clarke AR, Barry RJ, Bond D, McCarthy R, Selikowitz M. Effects of stimulant medications on the EEG of children with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Psychopharmacology.* 2002;164:277-284.
36. Basar-Eroglu C, Struber D, Schurmann M, Stadler M, Basar E. Gamma-band responses in the brain: a short review of psychophysiological correlates and functional significance. *Int J Psychophysiol.* 1996;24:101-112.
37. Jensen O, Kaiser J, Lachaux JP. Human gamma-frequency oscillations associated with attention and memory. *Trends Neurosci.* 2007;30:317-324.
38. Herrmann CS, Mecklinger A. Gamma activity in human EEG is related to high-speed memory comparisons during object selective attention. *Vis Cogn.* 2001;8:593-608.
39. Alderson RM, Kasper LJ, Hudec KL, Patros CH. Attention deficit/hyperactivity disorder (ADHD) and working memory in adults: a meta-analytic review. *Neuropsychology.* 2013;27: 287-302.
40. Shanahan MA, Pennington BF, Yerys BE, et al. Processing speed deficits in attention deficit/hyperactivity disorder and reading disability. *J Abnorm Child Psychol.* 2006;34:584-601.

41. Liss M, Saulnier C, Fein D, Kinsbourne M. Sensory and attention abnormalities in autistic spectrum disorders. *Autism*. 2006;10:155-172.