

トレイル・メイキング・テスト (Trail Making Test) 遂行時における前頭葉脳血流の変化 (2)

—日本版DN-CAS認知評価システムの下位検査「系列つなぎ」を用いて—

恵羅 修吉 ・ 西田 智子 ・ 中島 栄美子
(高度教職実践専攻) (特別支援教育) (高度教職実践専攻)

760-8522 高松市幸町1-1 香川大学教育学部

Prefrontal Blood Flow Alteration During Trail Making Test with Near-Infrared Spectroscopy (Part 2): On Planned Connections Subtest in the DN-CAS

Shukichi Era, Tomoko Nishida and Emiko Nakajima

Faculty of Education, Kagawa University, 1-1 Saiwai-cho, Takamatsu 760-8522

要 旨 本研究では、紙と筆記用具で実施される典型的なトレイル・メイキング・テスト (TMT) の難易度が前頭前野の活動に及ぼす影響について検討した。難易度は切り替えの有無とした。前頭前野の活動は近赤外線分光法 (NIRS) によりモニターした。切り替えを要する条件で課題遂行時間とOxyHb濃度変化に正の相関が認められた。実行機能を評価する検査としてのTMTの有用性と今後検討すべき点について考察した。

キーワード 実行機能 トレイル・メイキング・テスト NIRS DN-CAS

I 問題と目的

発達障害等の診断の有無にかかわらず、子どもたちの学習困難や適応困難の背景にある認知特性の一つとして実行機能の弱さが注目されている (e.g., Kaufman, 2010; Meltzer, 2007, 2010)。特に学習困難のある子どもたちは、学習場面や課題解決場面において「適切な方略を自発的に使用することの困難」や「複数の行為を同時に実行することの困難」、「課題と関連しない刺激や不必要な反応を効率よく抑制することの困難」を示すことが多い。課題を達成するために作業を適切かつ効率的に遂行するには、課題に即して自らの認知-行動系を調整するとともに、課題にとって不適切な刺激や反応を抑制すること、現在の行動が課題に適合しているか否かをオンラインでモニターすることが必要である。実行機能は、これらの認知機能を総称する概念である。すなわち、実行機能とは、適応的

で目標指向的な行動を遂行する際に必要とされる思考や行動を効率的に統制し調整する認知機能である。単一の全般的能力というよりは、多面的で複合的な高次認知機能群である (Goldstein & Naglieri, 2014)。実行機能の構成要素の大枠として、「シフティング：課題遂行に必要な課題セットを切り替える能力」「更新：必要な情報を常に最新のものにアップデートする能力」「抑制：優勢であるが不適切な反応を抑制する能力」が指摘されている (Miyake & Friedman, 2012)。

実行機能は、伝統的な神経心理学から近年の認知神経科学の知見より、①前頭葉、特に前頭前野/前頭連合野の関与が強いこと、②前頭領域の発達との関連性が高いことが指摘されている (Banich, 2009; 船橋, 2015; Stuss, 2011; Stuss & Alexander, 2000)。さらに実行機能は、発達障害のある子どもの認知特性を理解し、根拠に基づいた指導計画を作成するうえで価値

のある鍵概念として期待されている (Diamond, Barnett, Thomas, & Munro, 2007; Kaufman, 2010; McCloskey, Perkins, & Van Divner, 2009; Meltzer, 2007, 2010; 森口, 2015)。わが国においても教育に関わって実行機能への注目は高まっているが (e.g., 湯澤・湯澤, 2014), 一方で実行機能の評価方法に関する研究は決して多くはなく, 実行機能を的確かつ簡便に評価するアセスメント方法の開発が課題の一つになっている (相原, 2009; 青柳・保坂・相原, 2014)。

神経心理学の領域において, 実行機能の評価する検査法として広く使用されている検査の一つにトレイル・メイキング・テスト (Trail Making Test: 以下, TMTとする) がある (Bowie & Harvey, 2006; Strauss, Sherman, & Spreen, 2006)。典型的なTMTでは, 1枚の紙にランダムに配列された数字を1から順に結ぶ条件 (TMT-Aと呼ばれる) と, 同じく紙上にランダムに配列された数字と文字を「1→A→2→B」のように交互に結ぶ条件 (TMT-B) の2つの実施方法がある。いずれも課題遂行に費やされた時間あるいは制限時間内で引くことができた線の数を指標とする。TMT-Aでは視知覚, 視覚的処理速度, 空間的注意が, TMT-Bでは前者に加えてワーキングメモリや構えの切り換え能力 (set-shifting) あるいは認知的柔軟性 (cognitive flexibility) が主として関与していると考えられる。TMT-A, TMT-Bそれぞれの遂行成績を指標とする他に, 2条件の差 (B-A) あるいは比 (B/A, B:A) を指標とすることがある。差や比を算出することで, 処理速度や視知覚能力など両条件に共通して関与する認知的要因の影響を最小限とし, 切り替え能力など実行機能をより純粋に反映する指標となることが期待され研究が進められている (e.g., Arbuthnott & Frank, 2000; Axelrod, Aharon-Peretz, Tomer, & Fisher, 2000; Cavaco, Gonçalves, Pinto, Almeida, Gomes, Moreira, Fernandes, & Teixeira-Pinto, 2013; Corrigan & Hinkeldey, 1987; Crowe, 1998; Drane, Yuspeh, Huthwaite, & Klingler, 2002; Kortte, Horner, & Windham, 2002; Sánchez-Cubillo, Periañez, Adrover-Roig, Rodríguez-Sánchez, Ríos-Lago, Tirapu, & Barceló, 2009)。

本研究は, 紙と筆記用具で実施される古典的なTMTにおける課題の難易度が前頭前野の活動に及ぼす影響について検討することを目的とした。TMTの施行法にはバリエーションがあるが, 本研究では『日本版DN-CAS認知評価システム』(日本文化科学社;

以下, DN-CAS) の下位検査「系列つなぎ」を採用した。課題の難易度は, 切り換えの数で操作することにした。具体的には, 数字のみの系列順で線を引く切り換えのない単純条件, 数字と平仮名の交互に線を引く2交代条件, 数字・平仮名・アルファベットを交代して線を引く3交代条件を設定することにした。単純条件と2交代条件については, DN-CAS「系列つなぎ」と同じ図版を用いた。3交代条件については, 筆者らが新たに作成したものであり, 単純条件・2交代条件と同じフォント・サイズを用いるなどデザインを統一した。3交代条件は, 通常のTMTでは設定されていない課題であるが, 切り替えの効果を評価しやすくするために, より難易度の高い条件として設定した。

TMT遂行時における前頭前野の活動については, 近赤外線分光法 (Near-Infrared Spectroscopy; 以下, NIRSとする) による脳内血液酸素動態で評価することにした。NIRSとは, 頭皮および頭蓋骨など生体組織を通過しやすい近赤外光を頭皮上より照射し, 脳内で散乱してきた反射光を計測して, ある種の演算を介して酸素化ヘモグロビン (OxyHb), 脱酸素化ヘモグロビン (DeoxyHb), そして両者の和である総ヘモグロビン (Total Hb) の濃度変化を測定する技術である (福田, 2009; 小泉, 1998; 酒谷, 2012)。認知神経科学で用いられる生理機能測定の中なかでも, 生体に対する侵襲性が極めて低く, 頭部の可動性がある程度許容されるなど拘束性が低いという利点がある検査である。また測定機器の可搬性, 簡便性も高く, より日常的な状態で検査が実施できることも大きな利点である。

大脳皮質では, 神経活動の亢進にあわせて, その脳領域の血流量 (血液量) が増大する。NIRSを用いて脳血液におけるOxyHb濃度を計測することで, ある限定された脳領域 (入射-受光プローブを設置した直下の脳領域が該当する) の神経活動をモニターすることが可能となる。プローブは, 頭髪のない前額部に設置しやすいことから, NIRSは前頭葉機能の評価に活用されることが比較的多い生理指標である。NIRSを用いてTMT遂行時の脳血流動態を測定した研究は, 既にいくつかの研究が報告されている (恵羅・西田, 2021; Hagen, Ehli, Haeussinger, Heinzl, Dresler, Mueller, Herrmann, Fallgatter, & Metzger, 2014; Müller, Guhn, Zeller, Biehl, Dresler, Hahn, Fallgatter, Polak, Deckert, & Herrmann, 2014; 村田・村田・児玉・田中, 2008; Nakahachi, Ishii, Iwase, Canuet, Takahashi, Kurimoto, Ikezawa, Azechi, Kajimoto, &

Takeda, 2010 ; Rosenbaum, Blum, Schweizer, Fallgatter, Herrmann, Ehliis, & Metzger, 2018 ; Shibuya-Tayoshi, Sumitani, Kikuchi, Tanaka, Tayoshi, Ueno, & Ohmori, 2007 ; Takeda, Notoya, Sunahara, & Inoue, 2011 ; Weber, Lütschg, & Fahnenstich, 2004)。

惠羅・西田 (2021) は、成人を対象として、TMTとしてDN-CAS「系列つなぎ」を用いて遂行時間とNIRSによるOxyHb濃度変化の関係について検討した。その結果、行動指標では、単純条件に比べて2交代条件・3交代条件で遂行時間が顕著に延長した。また、NIRSにおけるOxyHb濃度変化では、課題の難易度が高まるにつれてOxyHb濃度変化量が増大した。3交代条件では、遂行時間とOxyHb濃度変化の間に有意な正の相関が認められた。以上より、TMTの難易度が前頭前野の活動に影響を及ぼすことから、TMTは前頭前野の活動が関与する実行機能の評価方法として妥当性を有することを示唆した。本研究は、基本的に、惠羅・西田 (2021) の追試を行うことを目的とした。手続きとして異なる点は、NIRSの分析におけるベースラインの設定である。惠羅・西田 (2021) では、プローブ設置の安静状態での測定値をベースラインとし、同じベースラインで3条件での測定値を補正した。本研究では、それぞれの条件の実施前にベースラインを測定することにした。すなわち、条件ごとにベースライン補正を行うことにした。

II 方法

1. 参加者

日本語を母国語とする成人13名 (女性9名, 男性4名 ; 平均年齢28.8歳, 範囲 : 20-45歳) が参加した。全員右利きで、視力 (矯正視力を含む) は正常域であり、課題遂行に問題はなかった。

2. 課題

TMTとしてDN-CASの下位検査「系列つなぎ」を活用した。「ワークブック8-17歳」をもとに、数字のみの系列順で線を引く練習問題Aと問題6 (単純条件とする)、数字と平仮名の交互で線を引く練習問題Bと問題8 (2交代条件とする)、これに加えて著者オリジナルとして、数字・平仮名・アルファベットを交代して系列順に線を引く3交代条件を設定した。3条件いずれも練習問題と本問題の2部構成とした。いずれの図版も文字間を結ぶ線が重ならないように数字・平仮名・アルファベットが配列された。課題の手続き

は、DN-CASの実施マニュアルの内容に準じた。単純条件では数字を順番につなぎ、2交代条件では数字と平仮名を交互に順番につなぎ、3交代課題では数字・平仮名・アルファベットの順番で系列順に線をつなぐこととした。正答の際に引く線の数は、単純条件で24ストローク、2交代条件で25ストローク、3交代条件で23ストロークとした。

3. 測定機器

脳内血液酸素動態を測定するため、2 chのNIRS機器 (Pocket NIRS Duo, Dynasense社, Japan) を使用した。本機器では、OxyHb濃度とDeoxyHb濃度、それと両者を加算した総Hb濃度の変化を測定することが可能であった。測定では、2つのプローブを脳波測定における国際10/20法に基づくFp1 (左側前頭極) とFp2 (右側前頭極) に相当する位置にそれぞれ付置した。これらの位置は、前頭前野の活動を測定することになる。データのSampling Rateは、10 Hzに設定した。プローブの固定と遮光のため、プローブの上から黒色のヘアバンドを重ねた。NIRSにより測定されたデータは、Bluetoothにより無線でPCに送信された。PCでは課題遂行中の濃度変化の波形をオンラインで観察できるようにした。課題遂行にかかる時間測定はNIRS専用アプリで行った。

NIRSで測定されたデータは血液中のOxyHbとDeoxyHbの相対的濃度変化であるため、基準値を設定してベースライン補正を行う必要がある。本研究では、ベースラインとして各条件実施前の10sec区間の平均値を用いることにした。課題遂行中の濃度変化は、各ベースラインを基準として、それぞれ算出した。

4. 手続き

検査は、静かな検査室で個別に実施された。参加者は、検査室の壁面に設置された机に向かい椅子に座った。検査者は、参加者の後方に位置し、課題の説明と機器制御を行った。はじめにNIRSのプローブを参加者の左右前額部に付置し、その後、開眼安静状態を数分間実施して波形の安定化を確認した。

安静時測定を実施した後、TMTの課題へと移行した。課題条件の順番は、全ての参加者に対して、単純条件、2交代条件、3交代条件の固定順とした。それぞれの条件において課題について説明を行い、課題理解を確認するために練習問題を実行した。練習問題ではスピードを求めることはしなかった。本問題では、「間違えないように素早くするようにしてください」と教示して実施した。課題遂行中は、正しい順番で線

がつながれていないときや、誤りが生じた時には、正確につなぐことができているところからもう一度始めるように指示した。その際、誤って引いた線を消すことは認めないことにした。やり直しをしている間も遂行時間に含めて計測を継続した。

5. 倫理的配慮

本研究は香川大学医学部倫理委員会の承認を得て実施した（受付番号：平成30-208）。検査実施前に文書と口頭で研究の目的と内容、個人特定回避の保証、結果の開示方法などについて説明した。説明を終えた後、検査の参加について署名による同意を得た。

III 結果

すべての参加者がすべての課題を完遂することができた。課題遂行中に誤った線分を引く現象は、単純条件では見られなかった。一方、2交代条件で4名、3交代条件では6名で誤って線を引く現象が確認された。

1. 遂行時間

各条件における全参加者の平均遂行時間をFigure 1に示す。単純条件における平均遂行時間は30.2 sec（範囲：19.8-41.7）、2交代条件では54.5 sec（範囲：33.7-106.8）、3交代条件では60.8 sec（範囲：36.5-125.8）であった。繰り返しのある一元配置分散分析

を実施した結果、主効果は有意であった（ $F(2, 24) = 9.74, p < .001, \text{partial } \eta^2 = .448$ ）。Bonferroniの下位検定を実施した結果、単純条件と2交代条件の間、単純条件と3交代条件の間に有意差が認められた（ $p < .01$ ）。

2. OxyHb濃度変化

左右前頭部における課題条件別のOxyHb濃度変化をFigure 1に示す。課題難易度が上がるにつれて、左右前頭部いずれにおいてもOxyHb濃度変化量の上昇が認められた。プローブ位置（左/右）×課題条件（単純/2交代/3交代）の繰り返しのある2要因分散分析を実施した。その結果、2つの主効果ならびに両者の交互作用ともに有意ではなかった（プローブ位置： $F(1, 12) = 0.26, \text{partial } \eta^2 = .021$ ；課題条件： $F(2, 24) = 1.02, \text{partial } \eta^2 = .078$ ；交互作用： $F(2, 24) = 0.50, \text{partial } \eta^2 = .040$ 、いずれも ns ）。

3. 遂行時間とOxyHb濃度変化の相関

各課題条件における遂行時間と左右前頭部OxyHb濃度変化の散布図をFigure 2に示す。単純条件では遂行時間とOxyHb濃度変化に関連性は見られない分布であったが、2交代条件と3交代条件では正の相関がみられた。各課題条件における遂行時間と左右前頭部OxyHb濃度変化に関するピアソンの積率相関係数をTable 1に示す。単純条件では有意な相関はないが、2交代条件と3交代条件では強い正の相関があり有意であった。

Figure 2では、課題遂行中に誤った線を引き修正をした参加者を示した。誤反応があった参加者でも、素早く修正することができて課題遂行時間の延長がみられない者については、OxyHb濃度変化は誤りがなかった参加者と同じレベルであった。一方、誤反応に伴って課題遂行時間に顕著な延長を示した者では、高いOxyHb濃度変化を示す傾向が認められた。

IV 考察

本研究では、TMTの難易度が前頭前野の活動に及ぼす影響について検討することを目的とした。課題難易度については、切り換え数による条件設定（単純/2交代/3交代条件）を行い、行動指標（遂行時間）で評価した。前頭前野の活動については、NIRSを用いてOxyHb濃度変化を測定した。

行動指標では、単純条件に比べて、2交代条件と3交代条件で遂行時間の顕著な延長がみられた。この結

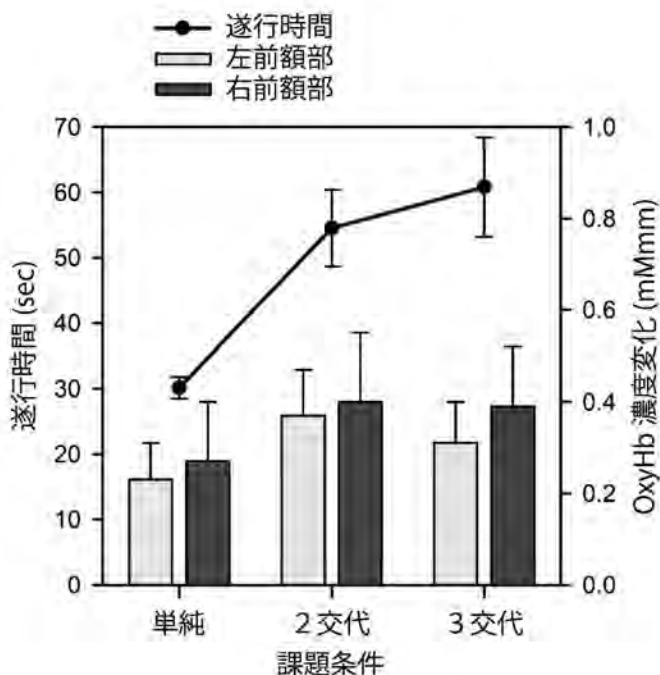


Figure 1 各課題条件における遂行時間とOxyHb濃度変化の平均および標準誤差

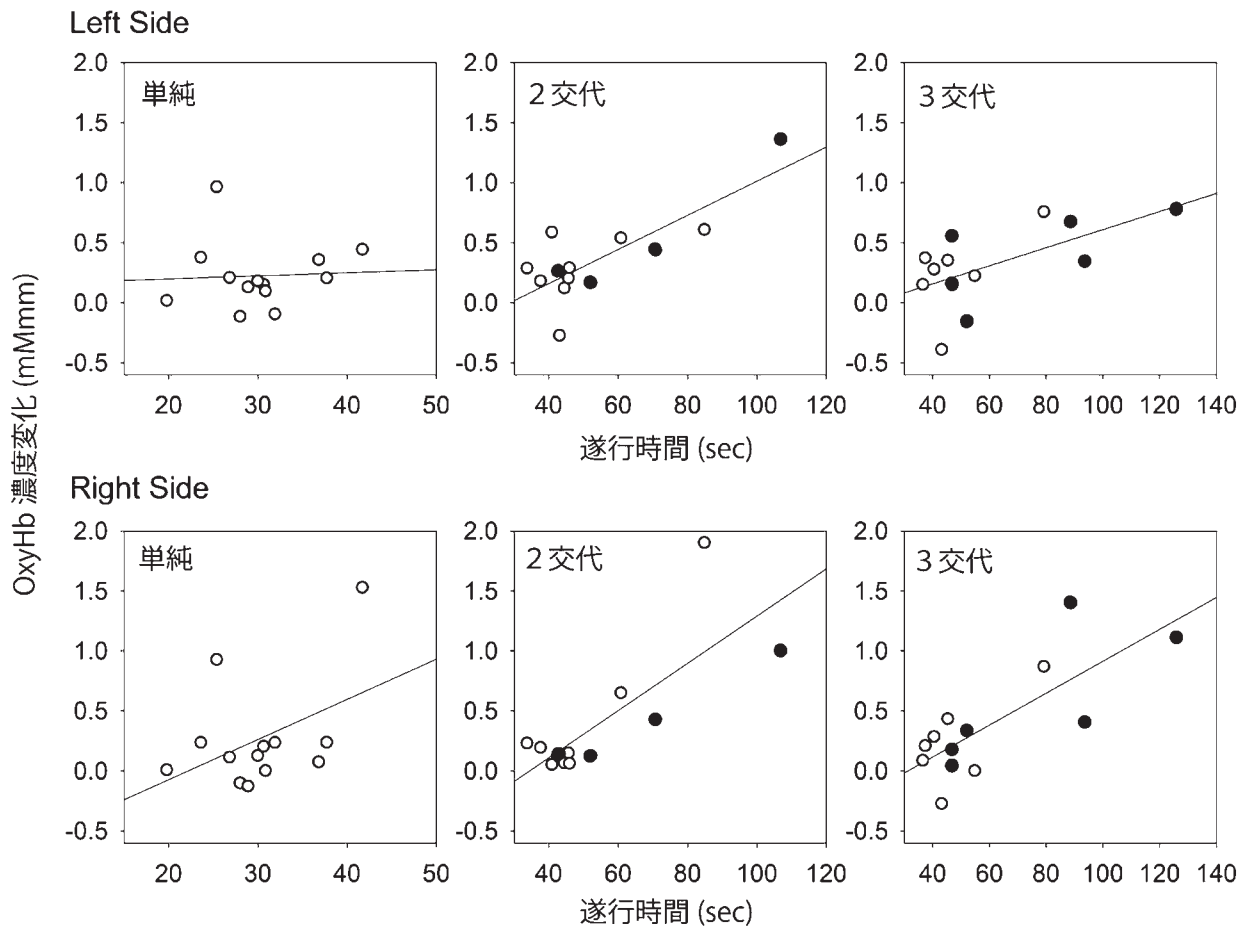


Figure 2 各課題条件における遂行時間と左右前頭部の平均OxyHb濃度変化との相関 (●は誤反応があった参加者を示す。)

Table 1 単純条件, 2交代条件, 3交代条件における遂行時間とOxyHb濃度変化との相関

	OxyHb濃度変化量					
	単純条件		2交代条件		3交代条件	
	左前額部	右前額部	左前額部	右前額部	左前額部	右前額部
遂行時間	.055	.434	.798**	.787**	.606*	.771**

* $p < .05$, ** $p < .01$

果は、恵羅・西田 (2021) の報告と同じであり、課題難易度を切り替え数で操作することの妥当性が再確認された。一方、生理指標であるOxyHb濃度変化では、課題条件の主効果に有意差が得られなかった。恵羅・西田 (2021) では、課題難易度が高まるにつれてOxyHb濃度変化量の有意な増大があったことから、本研究の結果は不一致をなすものとなった。記述統計的には、本研究の単純条件に比べて2交代・3交代条件で高いOxyHb濃度変化を認めたが、統計的有意には至らなかった。結果の不一致の原因としては、両研究におけるベースライン設定の違いが考えられる。恵

羅・西田 (2021) では、プローブ設置の安静状態での測定値をベースラインとし、同じベースラインで3条件の測定値を補正した。一方、本研究では、各条件の実施前にそれぞれベースラインを設定した。本研究における条件ごとのベースライン測定時における参加者の状態が、TMT課題 (3条件全てを含む課題全体) を実施する前の安静状態と同レベルに復帰していれば、恵羅・西田 (2021) と一致する結果が得られたかもしれない。課題全体と条件ごとのいずれのベースライン設定が妥当であるのか、今後の課題として残された。また、不一致の原因として考えられる第二の点

は、本研究における参加者で誤反応が多数認められたことである。惠羅・西田 (2021) では、誤反応はほとんど見られなかったため、誤反応の影響については分析していなかった。誤反応の扱いについては、後述するが、今後の課題として残された。

遂行時間とOxyHb濃度変化の相関については、単純条件は有意な相関ではなかったが、2交代条件と3交代条件では左右の前額部ともに強い正の相関が認められ、統計的に有意であった。この結果は、惠羅・西田 (2021) と一致するものである。遂行時間を課題難易度としてみた場合、課題遂行に努力を要し遅延が生じる参加者ほど前額部のOxyHb濃度変化が高い傾向を示すことが確認された。このことは、TMTが実行機能を支える神経基盤である前頭前野の神経活動を確かに反映した課題であることを支持するものである。切り替えのない単純条件では有意な相関がなく、切り替えのある2交代条件と3交代条件で有意な相関が認められたことから、前頭部OxyHb濃度変化の動態は、実行機能のなかでも課題や認知的構えを柔軟に切り替える能力、すなわち「シフティング」を反映していると考えられる。

本研究では、先に述べた通り、課題難易度を切り換え数で操作的に定義した場合には条件間のOxyHb濃度変化に有意差が認められなかった。一方、行動指標である遂行時間を難易度として個人間差をみれば、遂行時間が遅延した者ほど前額部OxyHb濃度変化が高かった。このことから、課題難易度については、課題条件として操作的に決めるだけでなく、行動指標により確認することが重要であるといえる。例えば、2交代条件で努力を要し時間がかかったものの、遂行の途中で効率的な切り替え方略を見いだした者は、3交代条件では2交代条件ほどの時間や努力を要せずに課題を完遂することが可能となることはあり得る現象であろう。また、同じ課題条件 (TMT-B) であっても難易度の高い条件を先に施行した場合 (TMT-B→TMT-A) と後に施行した場合 (TMT-A→TMT-B) では、OxyHb濃度変化が異なることが報告されている (Takeda, Notoya, & Sunahara, 2020)。以上より、個の認知機能を評価するための検査としては、操作的な視点からだけでなく、検査を受ける個々人の行動よりその困難さを推定する視点が必要であると考えられる。

本研究において事前に予想していなかった結果として誤反応の影響がある。脳損傷患者や認知症患者を対象としてTMTを実施した研究では誤反応について分

析したものがあるが (Ashendorf, Jefferson, O'Connor, Chaisson, Green, & Stern, 2008; Chan, MacPherson, Robinson, Turner, Lecce, Shallice, & Cipolotti, 2015; Christidi, Kararizou, Triantafyllou, Paraskevas, & Zalonis, 2013; Kopp, Rösser, Tabeing, Stürenburg, de Haan, Karnath, & Wessel, 2015; Stuss, Bisschop, Alexander, Levine, Katz, & Izakawa, 2001), 健常成人を対象とした研究で誤反応が分析されることは筆者が知る限りほとんどない (e.g., Bowie & Harvey, 2006)。本研究では、偶然かと思われるが、誤反応が出現した参加者が複数認められた。Figure 2をみると、誤反応が出現した参加者は、大きく2つの群に分かれているように見える。一つは誤反応がありながらも誤反応のない参加者と同等の遂行時間で課題を達成できている者と、もう一つは遂行時間に大きな遅延を示した者である。後者の群の参加者は、OxyHb濃度変化が高い傾向にあった。一つの解釈として、前者の群は誤反応が生じながらもすばやく補正することができたが、後者の群では誤反応を補正することがうまくいかずに混乱したことで遂行時間が延長したと考えられる。もしそうであるならば、後者の群については課題遂行方略的に混乱した状態で前頭前野の活動が高まったことになる。この活動の亢進は、はたして課題遂行方略を探るといった認知活動を反映しているのか、それとも混乱し焦っている状態を落ち着かせようという情動制御的な活動を反映しているのかが問題となる。実行機能については、認知的な制御に関わるcoolな実行機能と情動的な制御に関わるhotな実行機能が想定されている (森口, 2015; Peterson & Welsh, 2014)。筆者らは、coolな実行機能を想定して研究を行ってきたが、誤反応の影響を考慮するとhotな実行機能について検討を広げる必要がある。

最後に、惠羅・西田 (2021) では課題難易度が高くなるにつれて右前額部のOxyHb濃度変化が左前額部に比べて増大することが認められた。右半球は、一般的に、視空間処理や空間的注意に優位であることから、課題難易度が高まるにつれて右側前頭前野がより強く関与したのではないかと推察した。本研究では、左右差は統計的に有意でなく、先行研究と一致する結果とはならなかった。記述統計としてはFigure 1に示したように、いずれの条件でも左前額部に比べて右前額部でOxyHb濃度変化は高かった。本研究における参加者数が少なかったことが影響している可能性が考えられる。また、前頭部におけるOxyHb濃度変化に左

右差を認めていない先行研究 (Nakahachi et al., 2010; Shibuya-Tayoshi et al., 2007) もあり, 現時点において, 左右差については一貫した知見が得られていない。研究により測定指標・方法やTMT施行法の違いがあることから, 左右差については今後の検討課題である。

引用文献

- 相原正男 (2009) 小児の前頭葉機能評価法 認知神経心理学, 11, 44-47.
- 青柳閣郎・保坂裕美・相原正男 (2014) 前頭葉の発達とその障害 認知神経科学, 16, 49-54.
- Arbuthnott, K., & Frank, J. (2000) Trail Making Test, Part B as a measure of executive control: Validation using a set-switching paradigm. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 22, 518-528.
- Ashendorf, L., Jefferson, A. L., O'Connor, M. K., Chaisson, C., Green, R. C., & Stern, R. A. (2008) Trail Making Test errors in normal aging, mild cognitive impairment, and dementia. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 23, 129-137.
- Axelrod, B. N., Aharon-Peretz, J., Tomer, R., & Fisher, T. (2000) Creating interpretation guidelines for the Hebrew Trail Making Test. *Applied Neuropsychology*, 7, 186-188.
- Banich, M. T. (2009) Executive function: The search for an integrated account. *Current Directions in Psychological Science*, 18, 89-94.
- Bowie, C. R., & Harvey, P. D. (2006) Administration and interpretation of the Trail Making Test. *Nature Protocols*, 1, 2277-2281.
- Cavaco, S., Gonçalves, A., Pinto, C., Almeida, E., Gomes, F., Moreira, I., Fernandes, J., & Teixeira-Pinto, A. (2013) Trail Making Test: Regression-based norms for the Portuguese population. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 28, 189-198.
- Chan, E., MacPherson, S. E., Robinson, G., Turner, M., Lecce, F., Shallice, T., & Cipolotti, L. (2015) Limitations of the Trail Making Test part-B in assessing frontal executive dysfunction. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 21, 1-6.
- Christidi, F., Kararizou, E., Triantafyllou, N. I., Paraskevas, G. P., & Zalonis, I. (2013) Trail Making Test error analysis in classic motor neuron disease. *Neurological Sciences*, 34, 1367-1374.
- Corrigan, J. D., & Hinkeldey, N. S. (1987) Relationships between parts A and B of the Trail Making Test. *Journal of Clinical Psychology*, 43, 402-409.
- Crowe, S. F. (1998) The differential contribution of mental tracking, cognitive flexibility, visual search, and motor speed to performance on parts A and parts B of the Trail Making Test. *Journal of Clinical Psychology*, 54, 585-591.
- Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J., & Munro, S. (2007) Preschool program improves cognitive control. *Science*, 318, 1387-1388.
- Drane, D. L., Yuspeh, R. L., Huthwaite, J. S., & Klingler, L. K. (2002) Demographic characteristics and normative observations for derived-Trail Making Test indices. *Neuropsychiatry, Neuropsychology, and Behavioral Neurology*, 15, 39-43.
- 惠羅修吉・西田智子 (2021) トレイル・メイキング・テスト (Trail Making Test) 遂行時における前頭葉脳血流の変化: 日本版DN-CAS認知評価システムの下位検査「系列つなぎ」を用いて 香川大学教育学部研究報告, 4, 59-65.
- 福田正人 (2009) 精神疾患とNIRS: 光トポグラフィー検査による脳機能イメージング 中山書店.
- 船橋新太郎 (2015) 実行機能と前頭連合野の関与 心理学評論, 58, 55-71.
- Goldstein, S., & Naglieri, J. A. (2014) *Handbook of Executive Functioning*. Springer, New York.
- Hagen, K., Ehlis, A.-C., Haeussinger, F. B., Heinzl, S., Dresler, T., Mueller, L. D., Herrmann, M. J., Fallgatter, A. J., & Metzger, F. G. (2014) Activation during the Trail Making Test measured with functional near-infrared spectroscopy in healthy elderly subjects. *NeuroImage*, 85, 583-591.
- Kaufman, C. (2010) *Executive function in the classroom: Practical strategies for improving performance and enhancing skills for all students*. Paul H. Brookes Publishing Co. Baltimore, Maryland.
- 小泉英明 (1998) 新しい無侵襲性高次脳機能計測法: 光トポグラフィー 神経心理学, 14, 19-25.
- Kopp, B., Rössler, N., Tabelaing, S., Stürenburg, H. J., de Haan, B., Karnath, H.-O., & Wessel, K. (2015) Error on the Trail Making Test are associated with right hemispheric frontal lobe damage in stroke patients. *Behavioural Neurology*, ID 309235. doi.org/10.1155/2015/309235
- Kortte, K. B., Horner, M. D., & Windham, W. K. (2002) The Trail Making Test, part B: Cognitive flexibility or ability

- to maintain set? *Applied Neuropsychology*, 9, 106-109.
- McCloskey, G., Perkins, L. A., & Van Divner, B. (2009) *Assessment and intervention for executive function difficulties*. Routledge/Taylor & Francis Group. New York.
- Meltzer, L. (2007) *Executive function in education: From theory to practice*. Guilford Press. New York.
- Meltzer, L. (2010) *Promoting executive function in the classroom*. Guilford Press. New York.
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012) The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 21, 8-14.
- 森口佑介 (2015) 実行機能の初期発達, 脳内機構およびその支援 心理学評論, 58, 77-88.
- Müller, L. D., Guhn, A., Zeller, J. B. M., Biehl, S. C., Dresler, T., Hahn, T., Fallgatter, A. J., Polak, T., Deckert, J., & Herrmann, M. J. (2014) Neural correlates of a standardized version of the Trail Making Test in young and elderly adults: A functional Near-Infrared Spectroscopy study. *Neuropsychologia*, 56, 271-279.
- 村田伸・村田潤・児玉隆之・田中真一 (2008) 地域在住高齢者におけるTrail making test施行時の脳循環動態 理学療法科学, 23, 561-565.
- Nakahachi, T., Ishii, R., Iwase, M., Canuet, L., Takahashi, H., Kurimoto, R., Ikezawa, K., Azechi, M., Kajimoto, O., & Takeda, M. (2010) Frontal cortex activation associated with speeded processing of visuospatial working memory revealed by multichannel Near-Infrared Spectroscopy during advanced Trail Making Test performance. *Behavioural Brain Research*, 215, 21-27.
- Peterson, E., & Welsh, M. C. (2014) The development of hot and cool executive functions in childhood and adolescence: Are we getting warmer? In S. Goldstein & J. A. Naglieri (Eds.) *Handbook of Executive Functioning*. Springer Science + Business Media, New York. Pp.45-65.
- Rosenbaum, D., Blum, L., Schweizer, P., Fallgatter, A. J., Herrmann, M. J., Ehlis, A.-C., & Metzger, F. G. (2018) Comparison of speed versus complexity effects on the hemodynamic response of the Trail Making Test in block designs. *Neurophoton*, 5, 045007. doi : 10.1117/1.NPh.5.4.045007
- 酒谷薫 (2012) NIRS : 基礎と臨床 新興医学出版.
- Sánchez-Cubillo, I., Periáñez, J. A., Adrover-Roig, D., Rodríguez-Sánchez, J. M., Ríos-Lago, M., Tirapu, J., & Barceló, F. (2009) Construct validity of the Trail Making Test: Role of task-switching, working memory, inhibition/interference control, and visuomotor abilities. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 15, 438-450.
- Shibuya-Tayoshi, S., Sumitani, S., Kikuchi, K., Tanaka, T., Tayoshi, S., Ueno, S.-I., & Ohmori, T. (2007) Activation of the prefrontal cortex during the Trail-Making Test detected with multichannel near-infrared spectroscopy. *Psychiatry and Clinical Neurosciences*, 61, 616-621.
- Strauss, E., Sherman, E. M. S., & Spreen, O. (2006) *A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms, and commentary. Third Edition*. Oxford U.P. New York.
- Stuss, D. T. (2011) Functions of the frontal lobes: Relation to executive functions. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 17, 759-765.
- Stuss, D. T., & Alexander, M. P. (2000) Executive functions and the frontal lobes: A conceptual view. *Psychological Research*, 63, 289-298.
- Stuss, D. T., Bisschop, S. M., Alexander, M. P., Levine, B., Katz, D., & Izukawa, D. (2001) The Trail Making Test: A study in focal lesion patients. *Psychological Assessment*, 13, 230-239.
- Takeda, C., Notoya, M., & Sunahara, N. (2020) The effects of task order administration on test scores from the Trail Making Test: Near-Infrared Spectroscopy investigations. *World Journal of Neuroscience*, 10, 68-78.
- Takeda, C., Notoya, M., Sunahara, N., & Inoue, K. (2011) Identification of three factors influencing Trail Making Test performance using multichannel Near-Infrared Spectroscopy. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 223, 103-112.
- Weber, P., Lütschg, J., & Fahnenstich, H. (2004) Attention-induced frontal brain activation measured by Near-Infrared Spectroscopy. *Pediatric Neurology*, 31, 96-100.
- 湯澤正通・湯澤美紀 (2014) ワーキングメモリと教育 北大路書房.

利益相反

本研究に関して、開示すべき利益相反関連事項はない。

謝辞

本研究は、JSPS科研費18K02759の助成を受けた。記して謝意を表す。