

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—

惠 羅 修 吉¹ ・ 西 田 智 子²

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することを目的とした。TMTの難易度は、切り換えの有無とした。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、数字と平仮名で交互に線を引く2交代条件、数字・平仮名・アルファベットで交代して線を引く3交代条件を設定した。TMTにおける行動指標 (遂行時間) では、単純条件に比べて2交代条件・3交代条件において遂行時間の顕著な延長がみられた。一方、近赤外線分光法 (NIRS) による生理指標 (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が示唆された。

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

近年、学習困難のある子どもに対して個に即した適切な指導・支援を提供するために、「根拠に基づく教育実践」を確立することが特別支援教育の重要な課題となっている。「根拠に基づく教育実践」を実現するために心理学が貢献可能な領域の一つとして、子どもの認知機能をよりの確に評価する検査方法を開発すること、開発された検査の結果を指導法につなげること

があげられる (惠羅, 2007, 2020)。

学習困難のある子どもたちで頻繁に認められる認知特性の一つとして、実行機能の弱さがある。学習困難のある子どもは、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「課題と関連しない刺激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、不適切な刺激や反応を抑制し、

1 香川大学大学院教育学研究科

2 香川大学教育学部

さらに自らの行動が課題に適合しているか否かを作業遂行しながらモニターする必要がある。これらの認知機能を総称して実行機能といわれている。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。その構成要素としては、「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)。また近年の認知神経科学の見解より、実行機能は、①前頭前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; 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 et al., 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比較的少なく、実行機能を的確かつ簡便に評価する検査の開発が課題の一つになっている (青柳・保坂・相原, 2014)。

実行機能の評価法として、神経心理学の領域におい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 (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、紙上にランダムに配列された数字と文字を「1→あ→2→い」のように交互に結ぶ条件 (TMT-B) の2つのパターンがある。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して評価される。TMT-A は処理速度や注意の持続が、TMT-B はワーキングメモリや構えの切り換え能力 (set-shifting) が主として関与し

ていると考えられる (Sánchez-Cubillo, Periañez, Adrover-Roig et al., 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 として『日本版 DN-CAS 認知評価システム』(以下、DN-CAS) の下位検査「系列つなぎ」を採用した。TMT の難易度は、切り換えの数で操作した。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交代条件は DN-CAS 「系列つなぎ」と同等)。切り換えを要する条件で課題遂行時間が延長することで、条件間の難易度は確認可能であると考えた。

TMT 遂行中の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)、両者の和である総ヘモグロビンの濃度変化を測定する技術である (福田, 2009; 小泉, 1998; 酒谷, 2012)。生体に対する侵襲性が極めて低く、かつ拘束性が低いという利点を有する生理検査である。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 により脳血液の 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) 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、既にいくつか報告されているが (e.g., Hagen, Ehliis, Haeussinger, et al., 2010; Nakahachi, Ishii, Iwase et al., 2010; Rosenbaum, Blum, Schweizer et al., 2018; Shibuya-

Tayoshi, Sumitani, Kikuchi et al., 2007; Takeda, Notoya, Sunahara et al., 2011; Weber, Lütschg, & Fahnenstich, 2004), DN-CAS「系列つなぎ」の施行法で実施された研究は、筆者の知る限りない。

II 方法

1. 参加者

日本語を母国語とする大学生19名(女性 12名, 男性 7名; 平均年齢21.3歳, 範囲:19-22歳)が参加した。全員右利きで、視力(矯正を含む)は正常域であった。検査の開始に先立ち、すべての参加者に対して、文書と口頭で研究の目的と内容について説明した後、署名による同意を得た。

2. 課題

TMTとしてDN-CASの下位検査「系列つなぎ」を用いた。「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、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。各条件で練習問題と本問題の図版を用意した。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置された。課題は、DN-CASの実施マニュアルに従った。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。

3. 測定機器

脳内血液酸素動態を測定するため、2chのNIRS機器(Pocket NIRS Duo, Dynasense, Japan)を使用した。本機では、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る。測定では、2つのプローブを脳波における国際10/20法に基づくFp1(左側前頭極)とFP2(右側前頭極)にほぼ相当する位置にそれぞれ配置した。これらの位

置は、前頭前野の活動を測定することになる。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ヘアバントを重ねた。NIRSで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専用のソフト上で行った。

NIRSで測定されたデータは血液中のOxyHbとDeoxyHbの相対的濃度変化量であるため、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プローブ設置後に数分間の安静時測定を行った。課題について説明を始める前の20秒間を抽出してベースラインとした。課題遂行中の濃度変化は、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した。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、参加者の側面後方に位置し、課題の説明と機器の制御を行った。はじめにNIRS用のプローブを参加者の左右前額に附置し、その後、閉眼安静状態を1分間程度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、単純条件、2交代条件、3交代条件の固定順とした。それぞれの条件で課題について説明を行い、課題内容の理解を確認する練習問題を行った。その後、「間違えないように素早くするようにしてください」と教示を行い、本問題を実施した。課題遂行中は、正しい順番で線が繋がれていないときや、誤りがあったときには、正確につなぐことができていたところからもう一度始めるように指示した。その際、誤答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

すべての参加者に対して、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

1. 遂行時間

すべての参加者がすべての試行を適切に遂行することができた。各条件における全参加者の平均遂行時間を図1に示す。単純条件における平均遂行時間は31.1 sec ($SD=11.8$), 2交代条件では42.9 sec ($SD=15.6$), 3交代条件では48.0 sec ($SD=14.3$)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 ($F(2, 36)=20.77, p<.001, \eta^2=.536$)。TukeyのHSD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 ($p<.05$)。

2. OxyHb濃度変化

左右前頭部における課題条件別のOxyHb濃度の変化を図1に示す。課題難易度が高くなるにつれて、左右前頭部ともに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要因分散分析の結果、課題条件の主効果が有意であり ($F(2, 36)=7.03, p=.003, \eta^2=.281$), 両者の交互作用が有意であった (F

(2, 36)=4.17, $p=.023, \eta^2=.188$)。プローブ位置の主効果は有意でなかった ($F(1, 18)=1.04, p=.32, \eta^2=.054$)。交互作用が有意であったのでTukeyのHSD検定を実施した結果、3交代条件における左右差が有意であった ($p<.05$)。

3. 遂行時間とOxyHb濃度変化の相関

難易度の最も高い3交代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図2に示す。課題の遂行に多くの時間を必要とした者ほど高いOxyHb濃度変化を示す傾向がみられた。ピアソンの積率相関係数の結果、左右前頭部ともに、両者の相関は有意であった(左: $r=0.50$; 右: $r=0.51, ps<.05$)。なお、単純条件と2交代条件については、いずれも、遂行時間と左右前頭部OxyHb濃度変化との相関は有意ではなかった。

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。TMTの難易度については、切り換え数による条件設定を行い、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、課題遂行中のOxyHb濃度変化を測定した。

TMTにおける行動指標(遂行時間)では、単純条件に比べて、2交代条件と3交代条件において遂行時間の顕著な延長がみられた。一方、生理指標(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。また、3交代条件において、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。以上の結果は、TMT-AよりもTMT-Bで高いOxyHb濃度変化を示した先行研究(Rosenbaum et al., 2018; Shibuya-Tayoshi et al., 2007)と一致しており、TMTにおける課題難易度が前頭前野の活動に影響を及ぼすことが明らかに示された。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。本研究では課題難易度を系列セットの

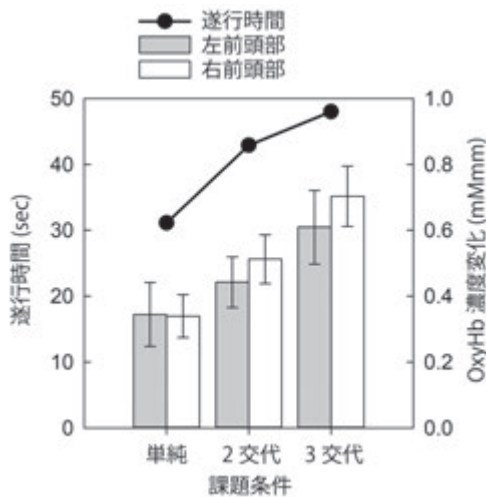


図1 各課題条件における平均OxyHb濃度変化(誤差範囲として標準誤差を示す)

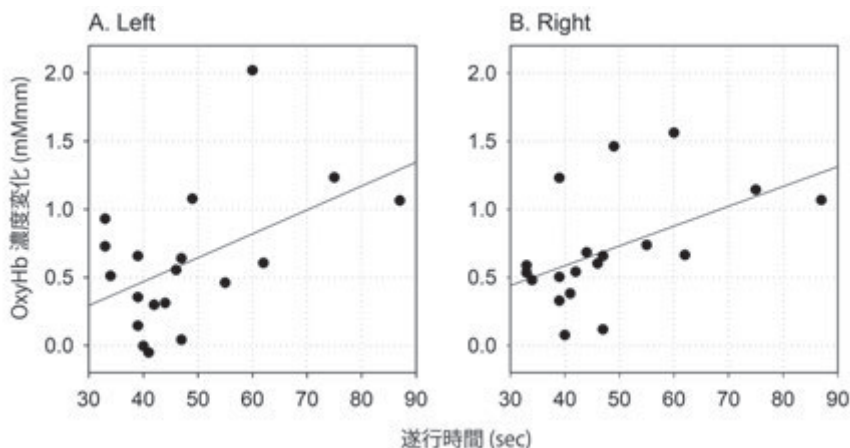


図2 3交代課題における遂行時間と各前頭部の平均OxyHb濃度変化との相関

切り換えとしたことから、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」を反映していると推察される。

左右前頭部におけるOxyHb濃度変化を比較すると、課題難易度が高くなるにつれて右前頭部でのOxyHb濃度変化が左前頭部に比べて増大する傾向が認められた。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いてより強く関与することになったのではないかと考えられる。TMTは、数字と文字を念頭で切り替えることが必要となる課題ではあるが、言語性ワーキングメモリだけではなく、目標検出のための効率的な視覚走査といった視空間ワーキングメモリの働きも重要な要因となる課題であると考えられる。なお、脳画像解析による研究では、切り換えを求めるTMT-Bの課題遂行において相対的に左前頭前野の活動が亢進することが報告されているが (Miskin, Thesen, Barr et al., 2015; Zakzanis, Mraz, & Graham, 2005), 右前頭葉 (下前頭回・中前頭回) の活動亢進を報告する研究もある (Jacobson, Blanchard, Connolly et al, 2011)。またNIRSを用いた研究では、前頭部におけるOxyHb濃度変化に左右差は認められていない (Nakahachi et al., 2010; Shibuya-Tayoshi et al., 2007)。以上、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、この点については、今後の検討課題である。

最後に、本研究ではTMTについて行動指標と生理指標の関連性について検討した。一般的に心理検査は行動指標を尺度とし、課題遂行の結果でもって評価されることが多く、遂行中に生じる認知処理 (の変化) について情報を得ることは難しい。課題遂行中の情報を得る手段の一つとして、生理指標を導入する意義がある。NIRSは、侵襲性および拘束性の低さより、臨床的にも応用可能なものであり、基礎研究のみならず臨床場面での事例検討など知見を重ねていくことで、認知機能評価の有用性を高めることが期待される (平野・藤岡・谷口, 2011; 皆川・安井・直井ら, 2017; Weber, Lütschg, & Fahnenstich, 2004)。

文献

- 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.
- Banich, M. T. (2009) Executive function: The search for an integrated account. *Current Directions in Psychological Science*, 18, 89-94.
- Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J., & Munro, S. (2007) Preschool program improves cognitive control. *Science*, 318, 1387-1388.

- 惠羅修吉 (2007) 根拠に基づく教育実践と心理学 上
越教育大学障害児教育実践センター紀要, 13, 7
-12.
- 惠羅修吉 (2020) 特別な教育的ニーズのある子どもの
支援 有馬道久・大久保智生・岡田涼・宮前淳子 (編)
学校に還す心理学：研究知見からともに考える教
師の仕事 ナカニシヤ出版. Pp.108-115.
- 福田正人 (編) (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.
- Hagen, K., Ehlis, A.-C., Haecussinger, 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.
- 平野大輔・藤岡崇・谷口敬道 (2011) リハビリテーショ
ン実践過程における機能的近赤外分光法 (fNIRS)
の有用性 国際医療福祉大学, 16, 34-46.
- Jacobson, S. C., Blanchard, M., Connolly, C. C., Cannon,
M., & Garavan, H. (2011) An fMRI investigation of
a novel analogue to the Trail-Making Test. *Brain and
Cognition*, 77, 60-70.
- 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.
- 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.
- 皆川泰代・安井愛可・直井望・山本淳一・鈴木健嗣
(2017) 発達認知神経科学におけるfMIRSの応用：
定型・非定型発達脳を可視化する 高次脳機能研究,
37, 174-180.
- Miskin, N., Thesen, T., Barr, W. B., Butler, T., Wang, X.,
Dugan, P., Kuzniecky, R., Doyle, W., Devinsky, O., &
Blackmon, K. (2015) Prefrontal lobe structural integrity
and trail making test, part B: Converging findings from
surface-based cortical thickness and voxel-based lesion
symptom analyses. *Brain Imaging and Behavior*, 10,
675-685.
- 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.
- 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.
- 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 (監修) (2012) NIRS：基礎と臨床 新興医学
出版.
- Sánchez-Cubillo, I., Periañez, 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 visuospatial 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.
- 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.
- Zakzanis, K. K., Mraz, R., & Graham, S. J. (2005) An fMRI study of the trail making test. *Neuropsychologia*, 43, 1878-1886.

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 26381325 ならびに 18K02759 の補助を受けた。本研究の実施にあたり、原田茉莉氏の協力を得た。記して謝意を表す。