

Stroop 試験に対する脳血流量の経時変化の一検討

合志 和洋^{1,*} 新谷 洋人¹

A Study on Temporal Changes of Cerebral Blood Flow for Stroop Color-Word Test

Kazuhiro Koshi^{1,*}, Hirohito Shintani¹

This paper attempts to estimate a level of concentration focusing on temporal changes of cerebral blood flow (CBF) for Stroop color-word test which is sometimes used in psychiatric research to induce prefrontal cerebral blood flow changes reflecting cognitive functions. The CBF is measured by near-infrared spectroscopy (NIRS) instrument and processed by time synchronous averaging. Then, the distinction of the concentration from the time synchronous averaged waveforms is also discussed.

キーワード：脳血流量, Stroop 試験, 近赤外線分光法, 同期加算平均

Keywords : CBF, Stroop Color-Word Test, NIRS, Time Synchronous Averaging

1. はじめに

内閣府が公開している平成 29 年度高齢社会白書によると、超高齢社会を迎えた我が国において、2012 年は認知症高齢者数が 462 万人で 65 歳以上の高齢者の約 7 人に 1 人であったが、2025 年には約 5 人に 1 人が認知症になるとの推計もある⁽¹⁾。日常生活に支障をきたしている高齢者を工学技術により支援することは喫緊の課題であるが、子供から大人に至るすべての人々が生活の質 (QOL) を高めて過ごせることもまた重要であり、日々の生活において「心地よさ」や「わくわく感」、「おもしろさ」などの感性を豊かにすることが、QOL を高める一助となると考える。

感性は、人により心理現象や知覚現象が個人の主観に依存して異なるため個人差がある。この感性を推定する研究は、生理学的あるいは心理学的なアプローチにより行われている⁽²⁻⁶⁾。生理学的アプローチでは、脳波や脳磁図などで検出した生体信号が用いられている。近年、ヒトの複雑な脳機能の計測装置として、大脳皮質の脳血流量 (CBF: Cerebral Blood Flow) の変化を非侵襲的に画像化する技術が利用されるようになってきた。その一つである近赤外分光法 (NIRS: Near-Infrared Spectroscopy) は、近赤外光を用いて脳内のヘモグロビン (Hb) 濃度を非侵襲

的に連続測定する比較的新しい技術である⁽⁷⁾。一方、心理学的アプローチでは、主観評価の結果から感性を推定する。筆者らは、以前から SD 法によるアンケート調査を行ってきたが、視聴覚刺激に対する感度を解析する手法として、視覚連続尺度 (VAS: Visual Analog Scale) についても検討している⁽⁸⁾。

本論文では、感性などの心理状態の一つとして集中度に着目し、Stroop 試験中の Hb 濃度を NIRS 装置により計測して得られた CBF により評価することを目的とする。そして、Stroop 試験におけるマッチングおよびミスマッチング状態に対する CBF の経時変化について検討する。

2. NIRS の原理

NIRS は、医療だけでなく学習や教育に関連した研究にも利用できる有望な装置であり、特に脳の機能活動に関連した血流動態反応を視覚化するものを fNIRS (functional NIRS) という。その原理は、図 1 に示すように、近赤外光を頭部に照射し、大脳表面からの反射光や散乱光を解析することで Hb 濃度を検出する。人間の頭部は、外側から順に、髪を含む頭皮、頭蓋骨、大脳皮質からなる層状構造をしている。頭皮の毛根の部分に近赤外線を照射すると、その光の一部は 25~30 mm の深さまで到達する。そして、大脳皮質で反射し、頭皮を通過して戻ってくる。頭皮を通過して戻ってきた反射光や散乱光を照射位置から 30 mm 程度離れた別の光ファイバーで検出すれば、図 1 の光経路に相当する大脳皮質の小領域の代謝分子を分光計測することができる。

¹ 電子情報システム工学系
〒861-1102 熊本県合志市須屋 2659-2
Faculty of Electronics and Information Systems Engineering,
2659-2 Suya, Koshi-shi, Kumamoto, Japan 861-1102

* Corresponding author:
E-mail address: kkoshi@kumamoto-nct.ac.jp (K. Koshi).

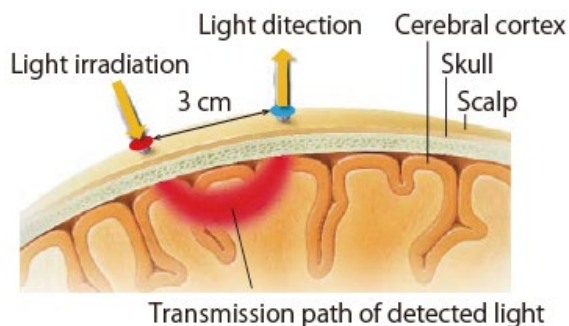


図1 NIRSの計測原理

大脳皮質の神経活動は、局所的な血液の動態に強い影響を与え、その様子は Hb のスペクトル解析によって観察することができる。肺の微小血管系で吸入酸素が赤血球中に拡散して迅速に Hb と結合した酸素化 Hb (Oxy-Hb) と、酸素を肺から身体組織へ運び終えた脱酸素化 Hb (Deoxy-Hb) は、図2に示すように 800 nm 付近に等吸収点を持ち、近赤外領域で異なる吸収スペクトルを持つ。この点付近の透過スペクトルを多波長かつ多点測定することで、Oxy-Hb と Deoxy-Hb の濃度を視覚化することができる。Oxy-Hb は、ヘマトクリット(血液中の赤血球の割合)が一定の条件下において CBF を反映することが知られている⁽⁹⁾。

本論文では、図3に示す WOT-100 (NeU 社製) を用いて NIRS 計測を行った。WOT-100 は、前頭前野の 10 チャンネルの Hb 濃度変化を 200 ms のサンプリング周期で測定することができる⁽¹⁰⁾。

3. Stroop 試験

Stroop 試験は、ある刺激に対する処理が、同じ刺激の別の属性に対する処理に影響を与えるときに生じる認知的干渉を抑制する能力を評価するものである。最も一般

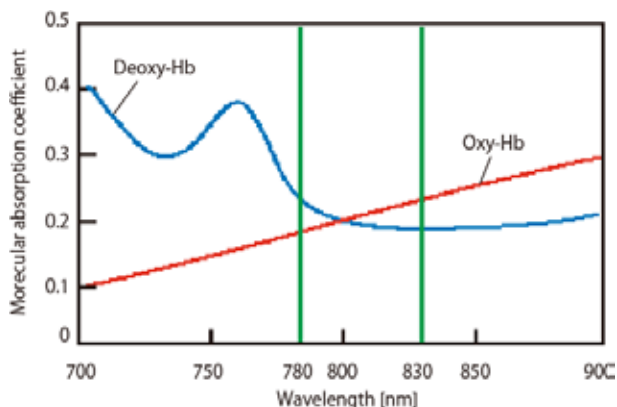


図2 Oxy-Hb と Deoxy-Hb の吸光スペクトル



図3 WOT-100 を装着した様子

的な日本語 Stroop 試験では、参加者に色を表す漢字の文字色を変えて見せ、それに対して参加者が色の名前を挙げる。認知的干渉は、文字意味と異なる文字色で提示されたときに生じる。一般に、文字色が文字意味と異なる場合(ミスマッチング)には、2つの属性が一致する場合(マッチング)に比べて被験者の識別時間が遅れ、誤反応が増加する。この現象は、Stroop 効果または Stroop 干渉として知られている⁽¹¹⁾。Stroop 試験は、習慣的な自動反応を抑制する能力を必要とするため、認知的干渉を抑制する能力をはじめ、注意、処理速度、認知的柔軟性、ワーキングメモリなどの認知機能の測定に広く用いられている。つまり、Stroop 試験を使用することで、複数の認知機能を測定することが可能である。

図4は、1回の Stroop 試験における 18 タスク分の提示画面を並べたものである。本論文では、提示された漢字の文字色と文字意味が一致した回数をカウントしてもらう。図4においては、2行5列目の漢字(緑色の“緑”)のみがマッチング、それ以外の 15 文字はミスマッチングである。

4. 実験

4.1 方法

本論文では、大きな精神疾患、神経疾患、外傷性脳損傷



図4 Stroop 試験 (18 タスク) の一例

の既往のない健康な2名の被験者（ともに20歳の男性）に参加してもらった。この実験に参加する前に、各参加者からインフォームドコンセントを得た。

この実験において、被験者はそれぞれ、コンピュータのモニターに向かって椅子に座った。モニターには、漢字で書かれた「赤」、「青」、「黄」、「緑」、「黒」、「桃」のうち、赤色、青色、黄色、緑色、黒色、桃色に着色されたものがランダムかつ順次表示される。本実験では、1回のStroop試験において、文字の色と意味が一致する10個と不一致の50個の合計60個のタスクが、1文字あたり3秒の提示時間でランダムに表示される。参加者は、文字色と文字意味の一致を認識した場合、できるだけ早く頭の中のカウントをインクリメントする。各受験者について、50回（5パターン×10回）のStroop試験を実施する間、WOT-100を用いて被験者のHb濃度を測定する。

WOT-100からのデータには、前処理として同期加算平均処理を施す。同期加算平均は、脳波などの時系列データの解析手法として最も一般的なものである。この手法は、誘発脳波や事象関連電位などの振幅の小さな脳波を視覚的に観測しやすくするために行われるもので、複数トライアルのデータを刺激提示時刻に揃えて加算平均すると、刺激に同期した成分であるデータのみが現れ、刺激に同期しないのは加算平均することで小さくなる。本実験では、タスクが表示された時刻の5秒前から5秒後までのNIRS信号を抽出し、マッチングとミスマッチにそれぞれ分離して平均化する。この処理により、ランダムノイズは表示されたタイミングとコヒーレントでないため平均化処理により徐々に打ち消され、タイミングと同期したコヒーレントな信号だけが加算効果で強調される。

4.2 結果

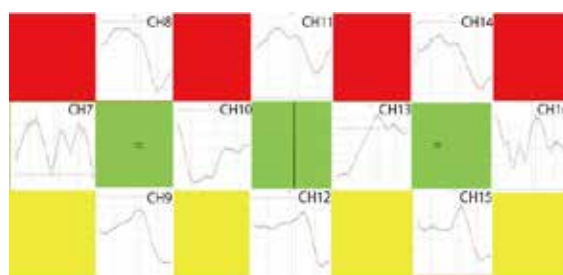
Stroop試験においてマッチングした場合の50個の波形を同期加算平均処理した結果を図5に示す。図5(a)はWOT-100のチャンネル配置を示しており、図5(b)は全10チャンネルの同期加算平均処理された波形を示したものである。ほとんどのケースで、タスク提示後0.6秒にOxy-Hb濃度値が上昇している。

マッチング時とミスマッチング時のHbの振る舞いを比較するために、全10チャンネルの同期加算平均波形をさらに平均化した。各条件の平均化された同期加算平均の結果を、図6に示す。マッチング時にはOxy-Hb濃度が上昇し、ミスマッチング時には低下または横ばいになっていることがわかる。

図6において、タスク提示の0.6秒後にピークが現れ



(a) WOT-100のチャンネル配置



(b) 全チャンネルの同期加算平均波形

図5 50回のStroop試験におけるマッチング時の加算平均処理の結果

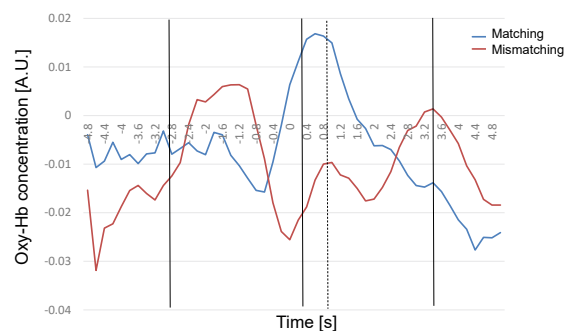


図6 マッチングおよびミスマッチング時における

このピークは、人の認知時に観測される脳波の事象関連電位P300が神経血管結合(NVC: Neuro-Vascular Coupling)として現れたものと考えられる。NVCとは、脳内で神経活動が生じると周辺の脳血管を流れる血液が局所的に増加する現象である。視覚刺激時の神経活動の活性化により、CBFが増加した可能性がある⁽¹²⁾。同期加算平均の結果とNVCの関係をより明確にするためには、さらなる実験と検証が必要である。

図7は、2名の被験者のマッチング時における同期加算平均処理された結果を比較するために、全チャンネル

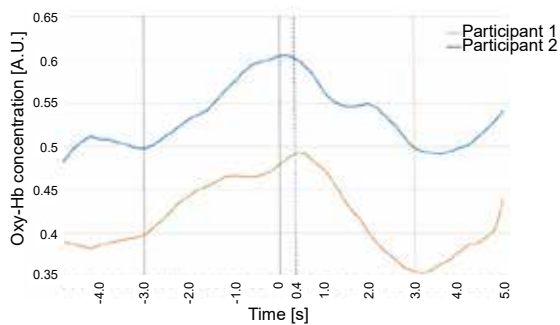


図7 マッチング条件における2人の被験者の同期加算平均波形の比較

の同期加算平均処理された波形を平均化したものである。いずれの被験者においてもタスク提示の3秒前からOxy-Hb濃度が増加し、被験者1は0.6秒後、被験者2は0.4秒後に最大値を示している。その後、次の文字が表示されるまで減少していることがわかる。

5. まとめ

本論文では、NIRS装置を用いてStroop試験に対するCBFの時間変化を明らかにし、CBFと集中度との関連性について検証することを目的とした。Stroop試験を行う際のNIRS信号をWOT-100により計測し、同期加算平均処理を施した。その結果、同期加算平均処理された波形はStroop試験のマッチング時とミスマッチング時とで異なる挙動を示すことがわかった。さらに、集中度とCBFの関係も明らかにした。Oxy-Hb濃度は、文字の色と意味が一致する色文字を表示したマッチング時において0.4~0.6秒程度をピークに増加し、次の課題を提示するまで徐々に減少することが確認された。2名の参加者の比較でも、同様の変化が観察された。

本論文では、Stroop試験でのマッチング時に文字色と文字意味の一致を認知時にP300が発生し、これに伴うNVCが観測されたことを示唆した。P300は、脳波として計測されるものであり、これに付随したNVCをNIRSで計測した研究は見当たらない。そのため、この関係を確認するためには、さらに詳細について慎重に研究する必要があると考える。さらに、同期加算平均処理を必要としないCBFの変化の判別方法として機械学習に着目し、CBFの時系列データそのものから集中度を自動的に判別することについても取り組み始めている。

(令和4年9月14日受付)

(令和4年11月4日受理)

- (1) 内閣府：「平成29年版高齢社会白書」, pp.19-21 (2017).
- (2) 福住伸一, 剣持聡久, 黒岩義之：「Delayed Matching Paradigmにおける生理指標の変動—脳波,心電RR間隔, 指尖脈波, 瞬目, 呼吸に着目して—」, 電子情報通信学会技術研究報告, MBE95-73, pp.71-78 (1995).
- (3) 今田俊明：「映像に対する脳からの磁界反応」, テレビジョン学会誌, Vol. 50, No.4, pp.443-449 (1996).
- (4) 大橋力, 仁科エミ, 不破本義孝, 河合徳枝, 田中基寛, 前川督雄：「脳波を指標とする映像情報の生体計測」, テレビジョン学会誌, Vol. 50, No.12, pp.1921-1934 (1996).
- (5) 久保田貴光, 山本尚武, 一色弘三：「皮膚電気活動を用いた情動評価のためのゆらぎ解析」, 電子情報通信学会技術研究報告, MBE96-45, pp.1-6 (1996).
- (6) 杉谷邦明, 合志和洋, 古賀広昭, 小山善文：「振動モータによる音楽情報伝達と曲調の定量化の検討」, 電子情報通信学会技術研究報告, HCS2000-18, pp.33-40 (2000).
- (7) H. Koizumi, A. Maki, T. Yamamoto, H. Sato, Y. Yamamoto, and H. Kawaguchi: "Non-invasive brain-function imaging by optical topography," Trend in Analytical Chemistry, Vol.24, No.2, pp.147-156 (2005).
- (8) N. Shirahama, S. Watanabe, K. Moriya, K. Koshi, and K. Matsumoto: "A new method of subjective evaluation using visual analog scale for sample data analysis," Journal of Information Processing, Vol.29, pp.424-433 (2021).
- (9) 星野達哉, 藤原徳生, 村田佳宏, 加納恒男, 酒谷薫, 片山容一：「可視光分光法を用いた術中脳酸素代謝モニタリングの臨床応用」, 脳循環代謝, Vol. 16, No. 4, pp. 267-275 (2004).
- (10) 脳計測ハードウェア (NIRS) & システム | 脳科学カンパニー【NeU】
<https://neu-brains.co.jp/solution/nirs/#eqInd01>
(2022/09/10 閲覧).
- (11) F. Scarpina and S. Tagini: "The Stroop color and word test," Frontiers in Psychology, Vol.8, pp.1-8 (2017).
- (12) K. Matsumoto and I. Kanno: "Anesthesia and the quantitative evaluation of neurovascular coupling," Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism, Vol.32, No.7, pp.1233-1247 (2012).